



**Rui Manuel
Pedrosa da Silva**

Modelação das Emissões Atmosféricas Associadas aos Transportes no Município de Leiria





**Rui Manuel
Pedrosa da Silva**

**Modelação das Emissões Atmosféricas Associadas
aos Transportes no Município de Leiria**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Doutora Oxana Tchepel, Investigadora Auxiliar do CESAM – Centro de Estudos do Ambiente e do Mar da Universidade de Aveiro

o júri

presidente	Professora Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda Professora associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro
arguente principal	Professora Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho Professora auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
vogal/orientadora	Doutora Oxana Anatolievna Tchepeleva Equiparada a investigadora auxiliar do Centro de Estudos e do Mar (CESAM) da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao Laboratório de Planeamento, Transportes e Sistemas de Informação Geográfica do Instituto Politécnico de Leiria, em particular, ao Eng. Nuno Pinto e ao Eng. Pedro Pereira, pela disponibilização de toda a informação relativa ao Projecto de Mobilidade Sustentável para o Município de Leiria.

À Fundação Luso-Americana, pelo financiamento que tornou possível a colaboração entre a Universidade do Estado da Carolina do Norte e a Universidade de Aveiro e, em particular, ao Dr. H. Christopher Frey pelo forte apoio e conhecimentos transmitidos e que me ajudaram a completar este trabalho.

Os meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que de forma directa ou indirecta contribuíram para a concretização deste trabalho, nomeadamente, à minha orientadora, a Professora Oxana Tchepel, aos meus amigos, à minha família e à minha namorada. Foi com a ajuda destas pessoas que consegui encontrar a força e a determinação para concluir este árduo projecto.

palavras-chave

Modelação de Emissões, Poluentes, Transportes rodoviários.

resumo

As emissões provenientes dos transportes rodoviários representam actualmente uma das principais fontes emissoras de poluentes para atmosfera, traduzindo-se em consequências graves ao nível da degradação da qualidade do ar e na saúde pública. Nesse sentido torna-se fundamental determinar as emissões dos transportes rodoviários, à escala regional e local, servindo essa estimativa como suporte para decisões estratégicas que visem a redução dos impactes resultantes das emissões.

Neste trabalho foram determinadas as emissões provenientes dos transportes rodoviários, na região correspondente ao Município de Leiria. Esta estimativa teve como base a utilização de factores de emissão estimados em função da velocidade média e utilizando para esse fim o modelo Transport Emission Model for Line Sources (TREM), em conjunto com dados de mobilidade, informação acerca da rede estradas da área de estudo e caracterização do parque automóvel com recurso a dados estatísticos.

Os resultados obtidos permitiram verificar a forte contribuição da zona urbana da área de estudo para as emissões totais quantificadas, com taxas de emissão mais elevadas do que na restante parte do concelho. As principais vias de acesso à zona urbana são aquelas cujos volumes de tráfego são superiores e onde consequentemente são emitidas maiores quantidades de poluentes.

Também foi utilizada uma simulação probabilística com base no método de Monte Carlo, com objectivo de quantificar as incertezas associadas às emissões calculadas, através da propagação da variabilidade e da incerteza existentes nos vários parâmetros de entrada no modelo emissões. Este cálculo permite conhecer a influência das incertezas associadas às emissões nas previsões relacionadas com a qualidade do ar, providenciando resultados mais completos para a sua introdução em modelos de dispersão atmosférica.

keywords

Emission Modeling, Pollutants, Road Transports.

abstract

Emissions from road transport are currently one of the major sources of atmospheric pollutants, having serious consequences in the degradation of air quality and public health. For this reason, quantification of the emissions from road transports become a crucial step, at local and regional scale, being used as support tool for strategic decisions that aim for the reduction emissions impacts.

In this work, a methodology for the estimation of road transport emissions was applied in the region corresponding to Leiria Municipality area. This estimation was based on emission factors that are function of average speed using the Transport Emission Model for Line Sources (TREM), together with mobility data, information about the road network of the case study and vehicle fleet characterization using statistical data as a resource.

The obtained results showed the important contribution of the urban area of the study domain for the total amount of the quantified emissions, with higher emission rates than the remainder of the municipality area. The main access routes to Leiria urban area are those where traffic volumes are higher and thus larger amounts of pollutants are emitted there.

A probabilistic simulation based on Monte Carlo approach was used in order to quantify the uncertainty associated with the emission estimations, by propagation of the variability and uncertainty existing in the various input parameters of the emission model. This estimation allow knowing the influence of emission uncertainties on the predictions related with air quality, providing more complete results to be inserted into atmospheric dispersion models.

ÍNDICE

Introdução	7
1. Os Transportes e a Qualidade do Ar	11
1.1 A Influência dos Transportes na Qualidade do Ar.....	11
1.2 Os principais poluentes	13
1.2.1 Matéria Particulada (PM)	13
1.2.2 Monóxido de Carbono (CO)	14
1.2.3 Compostos Orgânicos Voláteis (COV)	14
1.2.4 Óxidos de Azoto (NO _x).....	14
1.3 Enquadramento da Política Comunitária	15
1.3.1 Legislação da Qualidade do Ar	15
1.3.2 Instrumentos para a Imposição de Limites de Emissão dos Veículos	17
1.4 Situação Actual em Portugal	19
1.4.1 Evolução do Sector dos Transportes	19
1.4.2 Consumo de Energia nos Transportes.....	21
1.4.3 Emissões dos Transportes	23
2. Metodologia de Cálculo de Emissões	25
2.1 Tipos de emissões	26
2.2 Modelos de Emissões.....	28
2.2.1 Modelos de factores de emissão agregados.....	30
2.2.2 Modelos de Velocidade Média.....	31
2.2.3 Modelos de Situações de Tráfego	33
2.2.4 Modelos de Regressões multi-lineares	33
2.2.5 Modelos de Emissões Instantâneos	34
2.3 Modelos de Transporte	35
2.4 Modelo de cálculo de emissões (TREM)	37
2.4.1 Características gerais.....	37
2.4.2 Classificação dos veículos.....	40
2.4.3 O TREM e a sua Ligação a Outras Ferramentas.....	43

3. Caso de Estudo.....	45
3.1 Caracterização da área de estudo	45
3.1.1 Definição da Área de Estudo	45
3.1.2 Características Demográficas	46
3.1.3 Características da Mobilidade	47
3.2 Aplicação do Modelo de Cálculo	49
3.2.1 Recolha de Dados	50
3.2.2 Definição do Zonamento e Análise da Mobilidade	50
3.2.3 Rede de Estradas	52
3.2.4 Fluxos de Tráfego	53
3.2.5 Composição da Frota	55
3.2.6 Variação Diária do Tráfego	56
3.3 Resultados da Modelação das Emissões	57
3.3.1 Quantificação das emissões	58
3.3.2 Análise das Incertezas	60
4. Conclusões	67
5. Bibliografia.....	71
6. Anexos	79
A. Valores Limite de Concentração de Poluentes Estabelecidos Pelo Decreto-Lei 111/2002 de 16 de Abril.	79
B. Classes de Veículos Segundo o TREM.....	80
B.1 Atribuição das classes para os veículos Ligeiros de Passageiros a Gasolina.	80
B.2 Atribuição das classes para os veículos Ligeiros de Passageiros a Gasóleo.	80
B.3 Atribuição das classes para os veículos Ligeiros de Passageiros a GPL.....	81
B.4 Atribuição das classes para os veículos Ligeiros de Mercadorias a Gasóleo.....	81
B.5 Atribuição das classes para os veículos Pesados de Passageiros a Gasóleo.	81
B.6 Atribuição das classes para os Motociclos.	82
C. Atribuição das Categorias de Veículos por Tipo de Estrada.....	82
C.1 Atribuição dos diferentes tipos de veículos pelas estradas do Tipo 1 e 2.	82
C.2 Atribuição dos diferentes tipos de veículos pelas estradas do Tipo 3.	82
D. Distribuição Espacial dos Poluentes Atmosféricos Emitidos.....	83
D.1 Distribuição espacial das emissões diárias de CO ₂ (kg/km) no Município de Leiria.....	83

D.2	Distribuição espacial das emissões diárias de NO _x (g/km) no Município de Leiria.....	84
D.3	Distribuição espacial das emissões diárias de PM (g/km) no Município de Leiria.....	84
D.4	Distribuição espacial das emissões diárias de SO ₂ (g/km) no Município de Leiria.	85
D.5	Distribuição espacial das emissões diárias de COV (g/km) no Município de Leiria.	85
D.6	Distribuição espacial das emissões diárias de CO (kg/km) no Município de Leiria.....	86
E.	Datas de Implementação dos Limites de Emissão	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Emissões de PM na UE (27) por sector de actividade, em 2005.	12
Figura 2: Evolução do parque automóvel em circulação em Portugal de 1970 a 2006.....	20
Figura 3: Venda de Veículos Novos em Portugal de 1981 a 2007.....	20
Figura 4: Distribuição da extensão da rede nacional de estradas por tipo de estrada em 2007	21
Figura 5: Consumo energético por grandes sectores em Portugal e na UE (27).	21
Figura 6: Evolução do consumo de energia por tipo de transporte.....	22
Figura 7: Quotas de mercado por tipo de combustível em 2005.....	23
Figura 8: Evolução das emissões de CO, COVNM, NO _x e CO ₂ em Portugal.....	23
Figura 9: Esquema de relação entre os dados de entrada para o cálculo de emissões.....	30
Figura 10: Factor de emissão de NO _x para veículos ligeiros de passageiros a gasóleo e para o limite de emissão EURO1.	32
Figura 11: Diagrama do modelo de transportes de quatro fases.	36
Figura 12: Esquema principal de cálculo de emissões pelo TREM.	40
Figura 13: Classificação dos veículos no modelo TREM.	41
Figura 14: Município de Leiria.	46
Figura 15: Indicadores estatísticos do Concelho de Leiria.	47
Figura 16: Duração dos movimentos pendulares da população do município em 2001.....	48
Figura 17: Modos de transporte no Município de Leiria em 2001.....	48
Figura 18: Ligação entre as várias ferramentas de modelação das emissões.....	49
Figura 19: Definição do zonamento da área de estudo.	51
Figura 20: Rede de estradas modelada que serve o Município de Leiria.	53
Figura 21: Cilindradas dos veículos ligeiros de passageiros em Portugal.	55
Figura 22: Perfil médio de variação dos fluxos de tráfego para um dia útil do mês de Novembro de 2007, no Município de Leiria.....	57
Figura 23: Distribuição espacial das emissões diárias de CO no Município de Leiria.	59
Figura 24: Representação esquemática da aplicação do Método de Monte Carlo neste estudo. ..	62
Figura 25: Distribuição das classes de veículos representadas como intervalo [média- σ ; média+ σ].	63
Figura 26: Distribuição da velocidade média dos veículos no domínio de estudo.	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Padrões de emissão para os veículos ligeiros de passageiros a gasóleo.....	18
Tabela 2: Tipos de emissões calculadas pelo modelo TREM para cada poluente.	39
Tabela 3: Fontes da informação obtida para a área de estudo.	50
Tabela 4: Porção da Matriz Origem/Destino com o número de viagens realizadas.....	51
Tabela 5: Comparação entre os fluxos de tráfego de veículos ligeiros de passageiros, obtidos através do modelo de transportes e dos contadores de tráfego, correspondentes à média de um dia útil do mês de Novembro de 2007.....	54
Tabela 6: Comparação entre os consumos de gasolina determinados pelo modelo de emissões e através dos valores estatísticos da DGEG, para o ano de 2007 e para o município de Leiria.	54
Tabela 7: Distribuição por idades (%) dos veículos em circulação em Portugal em 31 de Dezembro de 2006	56
Tabela 8: Resultados das emissões diárias para o concelho de Leiria.	58
Tabela 9: Emissões horárias para o domínio de estudo ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	64

LISTA DE ABREVIATURAS

ACAP – Associação Automóvel de Portugal

ACEA – Associações Europeias da Indústria Automóvel

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

COVNM – Compostos Orgânicos Voláteis Não Metanogénicos

DEC/ESTG – Departamento de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria

DGEG – Direcção Geral de Energia e Geologia

EEV – Enhanced Environmentally-friendly Vehicle

EP – Estradas de Portugal

FDP – Funções de Densidade Probabilística

HC – Hidrocarbonetos

INE – Instituto Nacional de Estatística

JAMA – Associação dos Comerciantes de Automóveis Japoneses

KAMA – Associação dos Comerciantes de Automóveis Coreanos

NH₃ – Amónia

N₂O – Óxido Nitroso

NO_x – Óxidos de Azoto

O₃ – Ozono

OMS – Organização Mundial de Saúde

Pb – Chumbo

PAHs – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

PM – Matéria Particulada

POPs – Poluentes Orgânicos Persistentes

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SO₂ – Dióxido de Enxofre

TREM – Transport Emission Model for Line Sources

UE (27) – 27 Estados Membros da União Europeia

INTRODUÇÃO

A poluição do ar representa actualmente um problema sério para muitas cidades de países em desenvolvimento e mesmo nos países desenvolvidos [Gwilliam *et al*, 2004]. Apesar dos diversos progressos tecnológicos efectuados na indústria dos transportes rodoviários, estes continuam a ter implicações graves no ambiente. No entanto, os transportes são um elemento já integrado no nosso estilo de vida, daí que muito desenvolvimento tecnológico tenha incidido sobre a melhoria do desempenho ambiental dos veículos. Contudo, vários estudos têm apontado que o desenvolvimento tecnológico por si só não consegue solucionar os problemas existentes num futuro previsível. De facto, a tecnologia apenas consegue reduzir a sua magnitude [EEA, 2007c]. Por esse motivo, têm sido desenvolvidos, a nível comunitário e nacional, um conjunto de instrumentos legislativos, com vista a limitar as emissões de poluentes dos transportes de forma a minimizar os impactes que estas têm na qualidade do ar.

Nos últimos anos, tem-se verificado em Portugal uma tendência de aumento cada vez maior do número de veículos em circulação, com particular incidência nos veículos ligeiros de passageiros, resultando em alterações bastante significativas no que diz respeito à utilização de outros modos de transporte, como é o caso da diminuição da procura dos transportes colectivos de passageiros, pelo que seria desejável encontrar medidas que viessem alterar esta tendência [IMTT, 2006].

Para que possam ser efectuadas propostas de tomadas de decisão no sentido da diminuição da poluição atmosférica, torna-se fundamental conhecer a contribuição dos transportes para emissões de gases poluentes. Uma vez que a contribuição dos transportes rodoviários continua a ser significativamente responsável por uma grande parte da degradação da qualidade do ar, a aplicação de modelos de cálculo de emissões que permitam quantificar as emissões provenientes dos transportes será então uma ferramenta importante que servirá de suporte para a obtenção de soluções mais sustentáveis.

Os modelos de emissões permitem construir inventários de emissões provenientes dos transportes a nível local, regional ou nacional. Assim, é possível através da sua aplicação, quantificar as emissões libertadas e organizar essa informação com diferentes resoluções espaciais e temporais de forma a permitir a sua utilização em aplicações distintas. Vários estudos têm permitido concluir que os modelos de emissões podem diferir nos seus resultados, que poderão ser o reflexo da forma como o modelo é desenvolvido, uma vez que existirão diferenças na forma como os dados de entrada são inseridos, nos dados que são presumidos e nos

parâmetros que são tidos em conta [Reynolds *et al*, 2000]. Normalmente, o cálculo de emissões pelos transportes depende de diversos indicadores, tais como as condições do tráfego rodoviário (congestionado, fluído), as condições de operação dos veículos (quente, frio), a caracterização do parque automóvel (categoria, idade, cilindrada), padrões de condução, condições meteorológicas, topografia, entre outros.

O objectivo principal deste trabalho consiste na quantificação das emissões de poluentes provenientes do tráfego rodoviário no Município de Leiria através da aplicação do modelo Transport Emission Model for Line Sources (TREM), com uma resolução temporal que permita a sua utilização como dados de entrada num modelo de qualidade do ar. O trabalho encontra-se dividido em três Capítulos principais, existindo no final um capítulo com as conclusões do trabalho desenvolvido.

- O Capítulo 1, *Os Transportes e a Qualidade do Ar*, onde é feita uma abordagem global à importância dos transportes como sector contribuinte para a degradação da qualidade do ar. São discutidos vários aspectos relacionados com a poluição atmosférica e as implicações que esta tem na saúde pública e no ambiente. Neste capítulo também é feita uma análise da legislação europeia e nacional relativa às imposições estabelecidas no que diz respeito às emissões dos veículos e às características dos combustíveis utilizados. Esta análise tem como objectivo servir de suporte para a discussão das estimativas obtidas neste trabalho. Os principais poluentes libertados pelos transportes são analisados, explicando-se o modo como estes são emitidos para a atmosfera e quais os processos envolvidos na sua génese. Depois foi analisado o sector dos transportes em Portugal, a evolução do parque automóvel nacional e a contribuição do sector para a qualidade do ambiente, quer em termos de emissões de gases como no consumo energético.
- O Capítulo 2 contém a descrição da *Metodologia de Cálculo de Emissões* que foi utilizada neste trabalho. Foram explicados os conceitos e métodos que são utilizados na estimativa das emissões pelos transportes e os princípios de funcionamento do modelo TREM. Os métodos para a obtenção e tratamento dos dados de entrada no modelo de emissões também foram discutidos, como é o caso da caracterização do parque automóvel e da rede de estradas da área de estudo. Posteriormente, foram resumidos os conceitos e os

procedimentos utilizados para a estimativa dos fluxos de transporte através da aplicação de um modelo de transportes.

- No terceiro capítulo encontram-se apresentados e discutidos os resultados para o *Caso de Estudo* em que foi aplicado do modelo de cálculo de emissões ao domínio abrangido pelo município de Leiria. A informação relativa às emissões estimadas através do modelo TREM foi analisada e tratada com recurso a Sistemas de Informação Geográfica de forma a permitir conhecer a sua resolução espacial e temporal. Também foi efectuada uma análise das incertezas associada à estimativa do cálculo de emissões, considerando as distribuições probabilísticas e a variabilidade dos parâmetros tidos como fontes de incerteza. No final foram retiradas várias ilações acerca do trabalho desenvolvido no capítulo das conclusões.

1. OS TRANSPORTES E A QUALIDADE DO AR

Os transportes representam um papel chave no desenvolvimento da economia dos países, facilitando os acessos aos empregos, à educação, ao lazer e a outros serviços [Dora e Phillips, 2000]. No entanto, a situação actual traduz-se também em impactes negativos, não só ao nível do ambiente, como na saúde pública. As emissões provenientes dos transportes são, actualmente, um dos principais contribuintes para a poluição atmosférica em áreas urbanas [Yu *et al*, 2008]. Apesar de todos os poluentes serem potencialmente nefastos, a sua incidência e os seus impactes podem variar substancialmente [Gwilliam *et al*, 2004]. Nesse sentido, este capítulo pretende fazer uma abordagem aos principais poluentes emitidos pelos transportes e os impactes no ambiente e na saúde, bem como caracterizar a situação Portuguesa ao nível do sector dos transportes rodoviários e suas implicações ambientais.

1.1 A INFLUÊNCIA DOS TRANSPORTES NA QUALIDADE DO AR

Os transportes estão relacionados com uma vasta gama de impactes ambientais diferentes, incluindo por exemplo o ruído, a poluição do ar e as alterações climáticas. Uma proporção substancial da exposição humana à poluição atmosférica gerada pelos transportes rodoviários ocorre em áreas urbanas, que no fundo representam os espaços onde a maior parte da população europeia reside [EEA, 2007c].

A quantidade de poluentes emitidos para a atmosfera depende não só do número de veículos como também da sua idade, o tipo de motor e o seu estado de funcionamento, os tipos de combustíveis utilizados, e também das condições meteorológicas e da forma como o tráfego se encontra estruturado. Por exemplo, os veículos pesados, quando comparados com veículos ligeiros a gasóleo com catalisador, produzem entre cinquenta a cem vezes mais partículas ultra-finas por quilómetros percorridos [Dora e Phillips, 2000].

Na União Europeia, dados de 2005 permitem demonstrar que os transportes têm uma contribuição bastante significativa na emissão de poluentes para a atmosfera. Na Figura 1 é possível observar a contribuição dos transportes nas emissões de matéria particulada (PM), incluindo a PM primária (matéria particulada emitida directamente para a atmosfera) e PM secundária (resulta dos seus precursores, tais como o dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de azoto (NO_x) e amónia (NH₃) transformando-se em partículas através de reacções químicas na

atmosfera). Cerca de 31,3% das emissões de PM na UE (27) eram provenientes do sector dos transportes àquela data [EC, 2007].

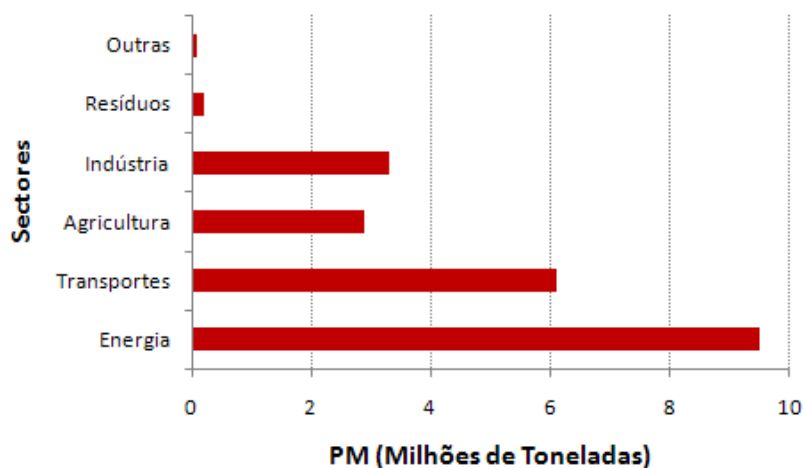


Figura 1: Emissões de PM na UE (27) por sector de actividade, em 2005 [EC, 2007].

O sector dos transportes é também um dos principais responsáveis pela existência de ozono ao nível da camada mais baixa da atmosfera, a troposfera, sendo por isso denominado por ozono troposférico. Este poluente não é emitido directamente para a atmosfera, ele é produzido através de processos fotoquímicos que envolvem reacções entre os seus precursores, NO_x , compostos orgânicos voláteis (COV), CO e metano (CH_4) [EC, 2007]. O ozono é um oxidante fotoquímico bastante forte e que em concentrações elevadas causa sérios problemas de saúde e danos graves ao nível dos ecossistemas, de culturas agrícolas e até mesmo nos materiais [EEA, 2008].

Torna-se ainda assim importante referir que os transportes rodoviários são também responsáveis em grande parte pelas emissões de gases de efeitos de estufa. Os poluentes responsáveis pelo efeito de estufa, como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) ou o óxido nitroso (N_2O) resultam do consumo de combustíveis fósseis, que no caso da Europa Central e Ocidental, representam cerca de 98% dos combustíveis utilizados. É esta forte relação com os combustíveis fósseis que permite que as emissões de gases de efeito de estufa esteja intimamente ligadas com a procura no sector dos transportes [EEA, 2007b].

1.2 OS PRINCIPAIS POLUENTES

Os principais poluentes incluídos nas emissões dos transportes rodoviários são: Os precursores do Ozono, nomeadamente, o Monóxido de Carbono (CO), os Óxidos de Azoto (NO_x) e os Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos (COVNM), são também os gases de efeito de estufa como o Dióxido de Carbono (CO₂), o Metano (CH₄) e o Óxido Nitroso (N₂O), as substâncias acidificantes, Amónia (NH₃) e Dióxido de Enxofre (SO₂), as Partículas (PM), as espécies cancerígenas como os Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (PAHs) e os Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs), substâncias tóxicas (dioxinas e furanos) e os metais pesados [EEA, 2007a]. Em baixo são descritos os principais poluentes provenientes das emissões dos transportes, regulamentados pela Directiva 98/69/CE.

1.2.1 Matéria Particulada (PM)

A *Matéria Particulada* não é apenas um único poluente mas sim uma mistura de várias sub-classes de poluentes, que ocorrem quer sob a forma sólida, quer sob a forma líquida. A Matéria particulada proveniente dos transportes rodoviários resulta em parte dos processos de combustão, mas também da erosão dos pavimentos pelo tráfego rodoviário e do desgaste dos travões e pneus [WHO, 2005]. A distribuição do tamanho das partículas é importante para conhecer os seus impactos na saúde. A Organização Mundial de Saúde (OMS) atribui um ênfase particular às partículas menores que 10 µm de diâmetro (PM₁₀), também conhecidas por *matéria particulada inalável*, e também as menores que 2,5 µm (PM_{2.5}), designadas por *matéria particulada fina ou respirável* [Gwilliam et al, 2004].

O tamanho das partículas determina o tempo que estas se encontram em suspensão na atmosfera. Enquanto a sedimentação e a precipitação remove as PM₁₀ da atmosfera em poucas horas, as PM_{2.5} poderão permanecer lá por muito mais dias ou mesmo semanas e, consequentemente, essas partículas poderão ser transportadas através de longas distâncias [WHO, 2005]. Evidências científicas emergentes indicam que quanto menor o diâmetro das partículas maior perigo estas representam para a saúde. As partículas maiores que 10 µm ficam depositadas, na sua maioria, nas cavidades nasais e na garganta, enquanto que as partículas menores que 1 µm podem atingir as regiões mais profundas dos pulmões. Por este motivo, os países industrializados deixaram de monitorizar as partículas totais em suspensão, que não se encontram directamente relacionadas com os efeitos na saúde, para monitorizarem apenas as PM₁₀ e as PM_{2.5} [Gwilliam et al, 2004]. Existem dados que revelam que a exposição a longo prazo a

níveis de matéria particulada observados em anos recentes na Europa, levarão a uma acentuada redução da esperança média de vida, devido a problemas cardio-respiratórios e mortalidade devidos a cancro de pulmão [WHO, 2003].

1.2.2 *Monóxido de Carbono (CO)*

O *Monóxido de Carbono*, é um poluente incolor e inodoro que se forma quando a reacção de combustão no motor não é completa. Em situações de congestionamento de trânsito ocorrem normalmente maiores emissões de CO, pelo que, nas cidades, cerca de 85 a 95% de todas as emissões de CO provêm da exaustão dos veículos [EPA, 2008]. Os maiores picos de emissões de CO costumam ocorrer normalmente nos meses mais frios do ano, devido à maior dificuldade de estabilização da temperatura do motor dos veículos, e também devido ao facto de ocorrerem mais frequentemente inversões de temperatura (os poluentes são retidos junto ao solo debaixo de uma camada de ar quente) [EPA, 2003].

Este poluente inibe a capacidade do sangue transportar oxigénio aos vários órgãos e tecidos. Pessoas com doenças crónicas do coração poderão sentir dores no peito quando as concentrações de CO são elevadas. A níveis muito elevados, o CO prejudica a visão e a destreza manual e pode levar à morte [Gwilliam *et al*, 2004].

1.2.3 *Compostos Orgânicos Voláteis (COV)*

Os *Compostos Orgânicos Voláteis*, juntamente com os NO_x, são uma das principais classes de poluentes precursoras do ozono troposférico. O termo COV é utilizado para designar os compostos orgânicos que, em condições normais de pressão e temperatura, se encontram em fase gasosa ou podem vaporizar-se para a atmosfera. Alguns compostos pertencentes a este grupo de poluentes incluem os alcanos, os alcenos, hidrocarbonetos aromáticos, aldeídos, cetonas, peróxidos orgânicos e compostos orgânicos halogenados [EPA, 2006]. O termo COVNM utiliza-se para designar os compostos orgânicos voláteis excluindo o metano, sendo o sector dos transportes uma das fontes emissoras deste grupo de poluentes [EEA, 2009].

1.2.4 *Óxidos de Azoto (NO_x)*

Os Óxidos de Azoto presentes no ar ambiente dizem respeito ao óxido de azoto (NO) e ao dióxido de azoto (NO₂). No momento da exaustão através de fonte poluidora, o NO, um poluente incolor e sem sabor, é o elemento predominante dos que constituem os NO_x [WBG, 1998]. Os óxidos de azoto formam-se quando os combustíveis são queimados a altas temperaturas, sendo o sector

dos transportes uma das suas principais fontes. Tanto os NO_x como os poluentes formados a partir destes podem ser transportados através de longas distâncias, pelo que os problemas associados a estes poluentes não se restringem apenas às áreas onde estes são emitidos.

Os NO_x, em conjunto com o dióxido de enxofre (SO₂), estão também na origem das chuvas ácidas responsáveis pela deterioração de materiais e vegetação [EPA, 1998]. No caso do NO₂, algumas evidências demonstram que a exposição a este poluente poderá ter efeitos ao nível da diminuição da função pulmonar e aumento de risco de sintomas respiratórios [WHO, 2003].

1.3 ENQUADRAMENTO DA POLÍTICA COMUNITÁRIA

O cálculo das emissões de poluentes provenientes dos transportes rodoviários surge como um processo importante para o alcance das metas e objectivos definidos a nível nacional e internacional na procura de uma melhor qualidade do ar ambiente. Nesse sentido importa então contextualizar a necessidade de conhecer a contribuição do sector dos transportes para a degradação da qualidade do ar através de uma abordagem aos principais documentos legais de referência relativamente à qualidade do ar e analisando também os instrumentos de política actualmente existentes para o cumprimento dos requisitos legais que abrangem o sector dos transportes rodoviários.

1.3.1 Legislação da Qualidade do Ar

O quadro legislativo actualmente em vigor referente à avaliação e gestão da qualidade do ar, é constituído por um conjunto de diplomas legais resultantes da transposição para o direito interno de cinco directivas comunitárias [APA, 2008a].

A Directiva-Quadro da Qualidade do Ar, Directiva 96/62/CE de 27 de Setembro, transposta para a ordem jurídica nacional através do Decreto-Lei n.º 276/99 de 23 de Julho, define as linhas de orientação da política de gestão da qualidade do ar, enquanto as Directivas Filhas definem os limites numéricos para a avaliação e gestão da qualidade do ar para os poluentes abrangidos [APA, 2008a].

A primeira “Directiva Filha” (Directiva 1999/30/EC) entrou em vigor em Julho de 1999 e limita os valores para os NO_x, NO₂, SO₂, Pb e PM₁₀ para o ar ambiente. Embora venham referidas tanto as PM₁₀ como as PM_{2.5}, apenas são estabelecidos requisitos de monitorização para as partículas finas. A segunda “Directiva Filha” (2000/69/EC) limita os valores para o benzeno e para o

monóxido de carbono para o ar ambiente. As duas “Directivas Filhas” descritas acima foram transpostas para o direito nacional através do Decreto-Lei n.º 111/2002 de 16 de Abril, que estabelece os valores limite das concentrações no ar ambiente dos poluentes abrangidos pelas directivas e define as regras de gestão de qualidade do ar a eles aplicáveis [\[APA, 2008a\]](#). No Anexo A encontram-se os valores limite estabelecidos pelo Decreto-Lei referido.

A terceira “Directiva Filha” (Directiva 2002/3/EC), sobre o ozono estabelece objectivos a longo prazo equivalentes aos valores guia apontados pela Organização Mundial de Saúde e objectivos intermédios para o ozono ambiente, a serem atingidos em 2010. Encontra-se em vigor desde Março de 2002 e foi transposta para o direito interno pelo Decreto-Lei n.º 320/2003 de 20 de Dezembro [\[APA, 2008a\]](#).

A quarta e última “Directiva Filha”, a Directiva 2004/107/CE de 15 de Dezembro, estabelece valores alvo para as concentrações médias anuais de arsénio, cádmio, níquel e benzo(a)pireno determinados na fracção de partículas inaláveis (PM₁₀). Também determina métodos e técnicas para avaliar as concentrações e deposição destas substâncias, garante a obtenção de informações adequadas e a sua divulgação junto do público. Esta directiva incide sobre determinados metais pesados e hidrocarbonetos aromáticos presentes nas partículas em suspensão exigindo a recolha da amostra e posterior análise laboratorial, como tal, a disponibilização da informação é efectuada numa base temporal diferente da dos restantes poluentes. Esta directiva foi transposta para o direito nacional pelo Decreto-Lei n.º 351/2007 de 23 de Outubro [\[APA, 2008a\]](#).

A 11 de Junho de 2008 entrou em vigor a nova Directiva 2008/50/EC para a qualidade do ar ambiente na Europa, que veio demonstrar o forte compromisso por parte da União Europeia em melhorar a qualidade do ar nos Estados Membros.

Esta Directiva veio assim fundir a maior parte da legislação anterior num só documento, ou seja, a Directiva Quadro da Qualidade do Ar e as três primeiras “Directivas Filhas”, excluindo-se então a quarta “Directiva Filha”. São estabelecidas novas metas e objectivos para as partículas finas (PM_{2.5}), incluindo novos objectivos de redução da exposição a este poluente, bem como valores limite da sua concentração. A nova Directiva permite também descontar a contribuição proveniente de fontes naturais aquando da avaliação da conformidade dos valores limite. Destaca-se também o facto de esta vir permitir uma maior flexibilidade aos Estados Membros em atingir algumas das metas em áreas de maior dificuldade de cumprimento, mais concretamente,

estendendo o tempo para o cumprimento das metas pretendidas até três anos após a entrada em vigor do documento, no caso das PM₁₀, e até um máximo de cinco anos, no caso do NO₂ e do benzeno, com base em determinadas condições e sob a avaliação da Comissão Europeia.

Os Estados Membros terão até 2 anos para procederem à transposição da nova Directiva, pelo que até lá se deverão reger pela legislação existente, ainda que algumas disposições tenham que ser implementadas mais cedo, como é o caso dos requisitos de monitorização das PM_{2.5} [UE, 2008].

1.3.2 Instrumentos para a Imposição de Limites de Emissão dos Veículos

Actualmente existe um conjunto de instrumentos de política comunitária e nacional que se encontram em fase de implementação ou em planeamento e, de cuja aplicação decorrem impactes sobre as emissões de poluentes para a atmosfera. Os instrumentos legislativos associados ao sector dos transportes rodoviários encontram-se explicitados a seguir.

Os limites de emissões impostos aos veículos a motor para as várias categorias de veículos traduzem-se em determinados padrões de emissão designados por normas EURO que foram especificados inicialmente pela Directiva 70/220/EEC, Directiva esta que tem sido revogada ao longo do tempo por outras que se lhe seguiram. Actualmente as emissões de poluentes de veículos rodoviários são regulamentadas separadamente para os veículos ligeiros e para os veículos pesados. No caso dos primeiros, o padrão de emissão actualmente em vigor é o padrão Euro 4, tal como definido na Directiva 98/69/EC, que é uma das Directivas que altera a Directiva 70/220/EEC. Esta Directiva estabelece os valores limite (Tabela 1) impostos aos novos veículos a motor para as várias categorias de veículos para o seguinte conjunto de poluentes: CO, Hidrocarbonetos (HC), COVNM, NO_x e PM [IA, 2004]. No seguimento do Programa CAFE¹ (Programa Ar Limpo para a Europa) e da comunicação da Comissão para o Conselho e para Parlamento Europeu acerca da Estratégia Temática sobre a Poluição do Ar, foram já acordados os novos padrões Euro 5 e Euro 6 que, no caso do Euro 5 entrará em vigor a 1 de Setembro de 2009 e no caso do Euro 6 a 1 de Janeiro de 2014. A principal consequência do padrão Euro 5 consiste em reduzir as emissões de matéria particulada dos veículos a gasóleo de 25 mg/km para 5 mg/km. Já o padrão Euro 6 pretende a redução das emissões de NO_x de 180 mg/km para 80 mg/km.

¹ O Programa CAFE foi um programa lançado em Março de 2001 com o objectivo de desenvolver a longo prazo, assessoria política estratégica e integrada de forma a proteger a saúde humana e o ambiente dos efeitos negativos da poluição do ar [CE, 2001].

Quanto à legislação actualmente em vigor para os veículos pesados são a Directiva 2005/55/EC e a Directiva 2005/78/EC. Segundo esta legislação o padrão de emissão em vigor é o Euro 5, que terá entrado em vigor em Outubro de 2008. Também define um padrão não vinculativo designado por EEV (Enhanced Environmentally-friendly Vehicle) [CE, 2008].

Tabela 1: Padrões de emissão para os veículos ligeiros de passageiros a gasóleo [Krzyzanowski *et al*, 2005].

Padrão	Ano de Implementação	Emissões Poluentes Regulamentados (g/km)			
		CO	HC e NO _x	NO _x	PM
Euro 1	1992	2,72	0,97	-	0,14
Euro 2	1996	1,00	0,90	-	0,10
Euro 3	2000	0,64	0,56	0,50	0,05
Euro 4	2005	0,50	0,30	0,25	0,025

As Directivas 98/70/CE e 2000/71/CE estabelecem especificações ambientais para a gasolina sem chumbo e para o combustível para motores a diesel. Estabelecem limites específicos para alguns parâmetros no que se refere a gasolina (benzeno, teor de enxofre, teor de chumbo) e gasóleo (índice de cetano, PAHs e teor de enxofre) [IA, 2004]. A Directiva 98/70/CE foi mais tarde alterada pela Directiva 2003/17/EC no que diz respeito às especificações da gasolina e do gasóleo, tendo esta modificação apenas alterado os valores limite de enxofre estabelecidos na mesma. No entanto, devido à evolução contínua da legislação sobre as emissões e à ligação existente entre a tecnologia dos veículos e as especificações dos combustíveis, torna-se indispensável uma revisão da qualidade dos combustíveis, através da revisão da Directiva 98/70/CE. Esta revisão foi já proposta pela Comissão Europeia em Janeiro de 2007, introduzindo também mecanismos de monitorização e redução das emissões de gases de efeitos de estufa resultantes da utilização dos combustíveis nos transportes rodoviários [CEC, 2007].

Adicionalmente, o Programa Auto-Oil estabelece um acordo voluntário entre a UE e as associações da indústria automóvel que tem como objectivo reduzir o factor de emissão médio de CO₂ dos automóveis para 140 g/km, em 2008 para a ACEA (Associações Europeias da Indústria Automóvel) e em 2009 para a JAMA (Associação dos Comerciantes de Automóveis Japoneses) e KAMA (Associação dos Comerciantes de Automóveis Coreanos) [IA, 2004].

1.4 SITUAÇÃO ACTUAL EM PORTUGAL

O sector dos transportes é indispensável à promoção da mobilidade de pessoas e bens, constitui um elemento base para a realização das actividades económicas e sociais, tendo, em Portugal, assumido particular predomínio o modo rodoviário [IMTT, 2006]. Nesse sentido, torna-se importante caracterizar de forma detalhada o sector dos transportes rodoviários em Portugal, conhecendo a sua evolução ao longo dos anos e a sua associação com o consumo energético e com as emissões dos poluentes atmosféricos.

1.4.1 *Evolução do Sector dos Transportes*

Nos últimos anos o sector dos transportes rodoviários em Portugal tem sofrido várias alterações no que diz respeito à utilização dos diferentes modos de transporte, à composição do parque automóvel e mesmo em relação às infra-estruturas rodoviárias. Tem-se verificado uma diminuição significativa na procura dos transportes colectivos rodoviários de passageiros, situação esta, que poderá encontrar alguma explicação no elevado crescimento no parque de veículos ligeiros em circulação, na melhoria da rede viária e na deficiente articulação do sistema de transportes públicos. A alteração a esta situação, desejável a vários títulos e onde se inclui a questão ambiental, parece tornar necessária a implementação de medidas restritivas de circulação e estacionamento de veículos de transporte individual nas zonas urbanas, assim como de uma frequente e consistente implementação de oferta organizada de transporte público de passageiros, aliás como já se verifica em bastantes cidades europeias [IMTT, 2006].

Segundo os últimos dados da Associação Automóvel de Portugal (ACAP), o parque automóvel em circulação em Portugal incluindo os ligeiros de passageiros e todo-o-terreno, os comerciais ligeiros e os pesados de mercadorias e de passageiros, eram em final de Dezembro de 2006 de 5,6 milhões de veículos, discriminando-se a sua evolução e estrutura na Figura 2 [IMTT, 2006].

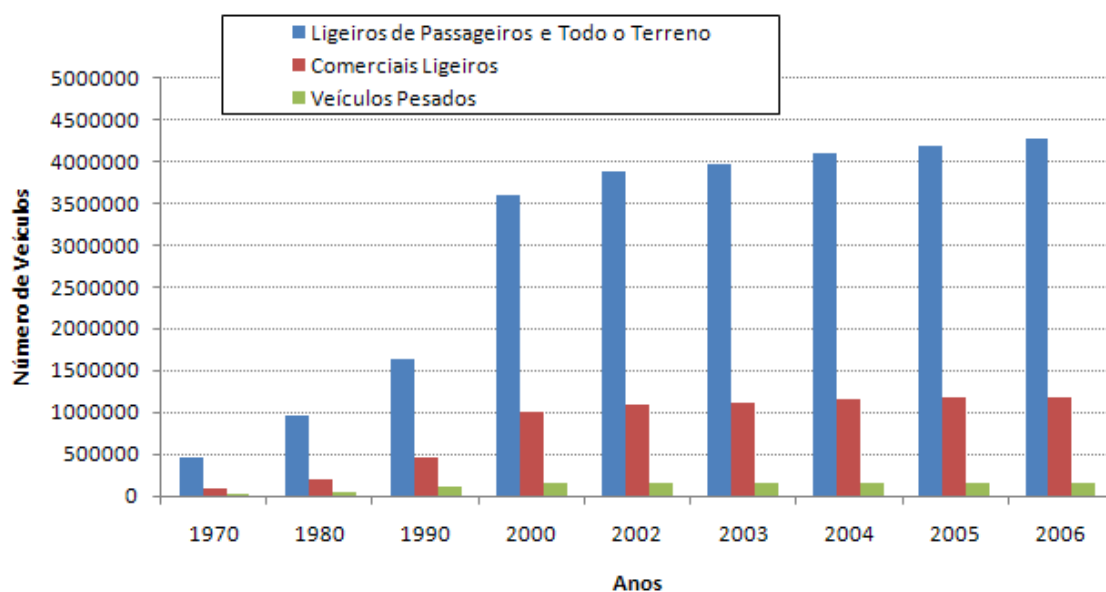


Figura 2: Evolução do parque automóvel em circulação em Portugal de 1970 a 2006 [IMTT, 2006].

Entre 1970 e 2006 o parque automóvel em circulação em Portugal apresentou uma tendência de aumento a ritmos crescentes (cerca de 10 vezes o valor de 1970), registando-se o maior aumento relativo nos veículos comerciais ligeiros. No que respeita ao número de veículos pesados em circulação manifestou-se apenas um ligeiro aumento de 1,5 % no último ano face aos valores de 2005.

Analisando a Figura 3 os valores das vendas de veículos ligeiros novos desde 1981 é possível observar que, apesar do ligeiro decréscimo de vendas entre 2001 e 2007, houve um crescimento 2,4 vezes nas vendas de 2007 relativamente ao início da década de 80 [IMTT, 2006].

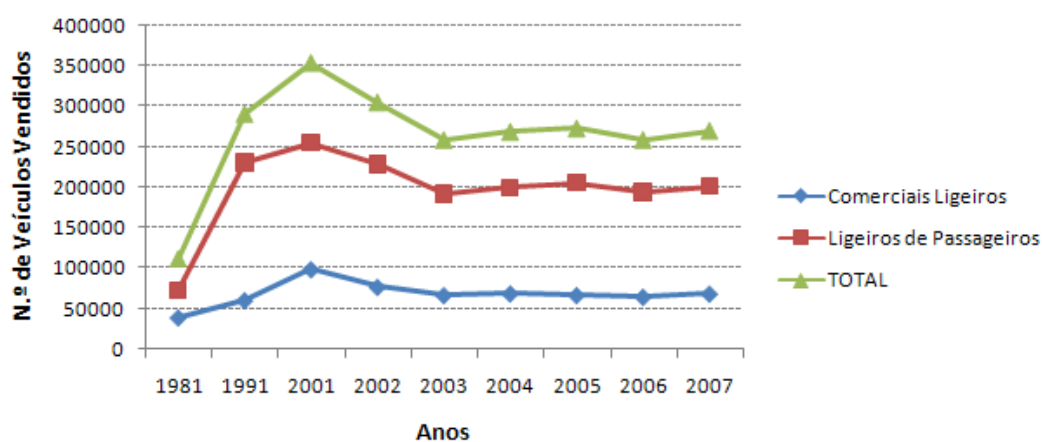


Figura 3: Venda de Veículos Novos em Portugal de 1981 a 2007 [IMTT, 2006].

No que diz respeito às infra-estruturas de transportes, a extensão de estradas da rede nacional, em 2007, totalizou 12 902 km (mais 7,4% do que a extensão existente em 2001 [IMTT, 2006]). Na Figura 4 é possível observar a distribuição da extensão do total das estradas nacionais por tipo de estrada. É de destacar ainda um acréscimo de 2,7% da extensão das auto-estradas relativamente a 2006, totalizando assim em 2007, cerca de 2 613 km de extensão [INE, 2008].

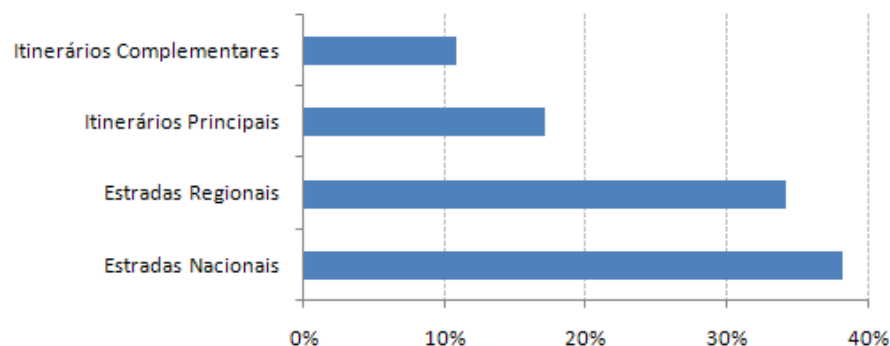


Figura 4: Distribuição da extensão da rede nacional de estradas por tipo de estrada em 2007 [INE, 2008].

1.4.2 Consumo de Energia nos Transportes

Em Portugal, o sector dos transportes é um dos sectores de actividade que maior consumo energético apresenta. Dados de 2006, segundo os grandes sectores de actividade considerados no âmbito do EUROSTAT, mostram que o consumo energético dos transportes é superior em 7 pontos percentuais à média da energia consumida nos 27 países da União Europeia (Figura 5) [APA, 2008b].



Figura 5: Consumo energético por grandes sectores em Portugal e na UE (27) [APA, 2008b].

Quanto aos vários modos de transporte, o modo rodoviário é aquele que mais energia consome em Portugal, sendo responsável por cerca de 90% do consumo energético do sector. De referir também o facto deste valor se manter praticamente constante desde 2002, como se pode constatar na Figura 6, sendo este facto revelador de que as intervenções estratégicas a este respeito foram pouco significativas.

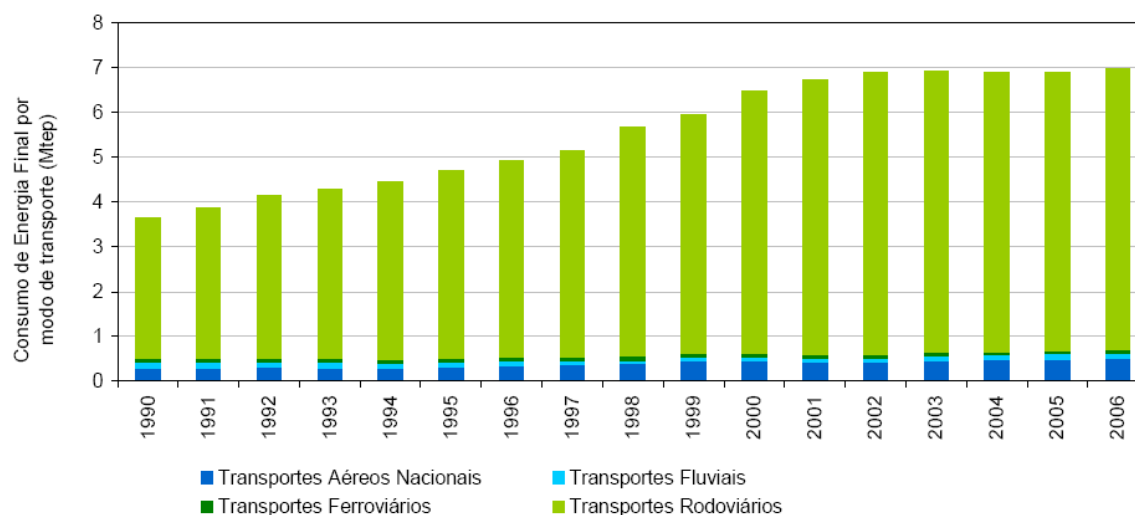


Figura 6: Evolução do consumo de energia por tipo de transporte [APA, 2008b].

Dados da Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG) revelam que nos 10 anos compreendidos entre 1995 e 2005 o consumo de combustíveis evoluiu em Portugal a um ritmo crescente, registando-se um valor de crescimento de 5,3% por ano, ainda que nos últimos 4 anos se tenha observado um abrandamento. Esta evolução encontra-se associada ao aumento do número de veículos em circulação, em particular, o acréscimo observado na procura de transportes de passageiros em veículos ligeiros.

No que diz respeito aos diferentes combustíveis utilizados, em termos relativos o gasóleo prevalece como o principal combustível consumido, relacionando-se esta evidência com o facto do preço deste combustível ser inferior ao dos restantes [APA, 2008b].

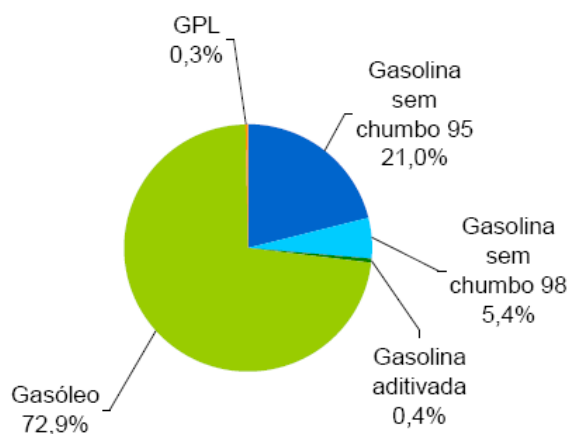


Figura 7: Quotas de mercado por tipo de combustível em 2005 [APA, 2008b].

1.4.3 Emissões dos Transportes

No período de 1990 a 2007, as emissões provenientes dos transportes tiveram um aumento crescente para a maior parte dos poluentes, devendo-se este aumento ao rápido crescimento das frotas de veículos, bem como do número de viagens realizadas, que foram reflexo do aumento do rendimento das famílias e do grande investimento feito em infra-estruturas rodoviárias na década de 1990. Indirectamente, esta evolução acabou também por ter um impacto significativo no aumento das emissões resultantes do armazenamento, manipulação e distribuição dos combustíveis fósseis [Pereira *et al*, 2009]. A Figura 8 permite observar a evolução das emissões de CO, COVM, CO₂ e NO_x emitidas pelo sector dos transportes, entre 1990 e 2006.

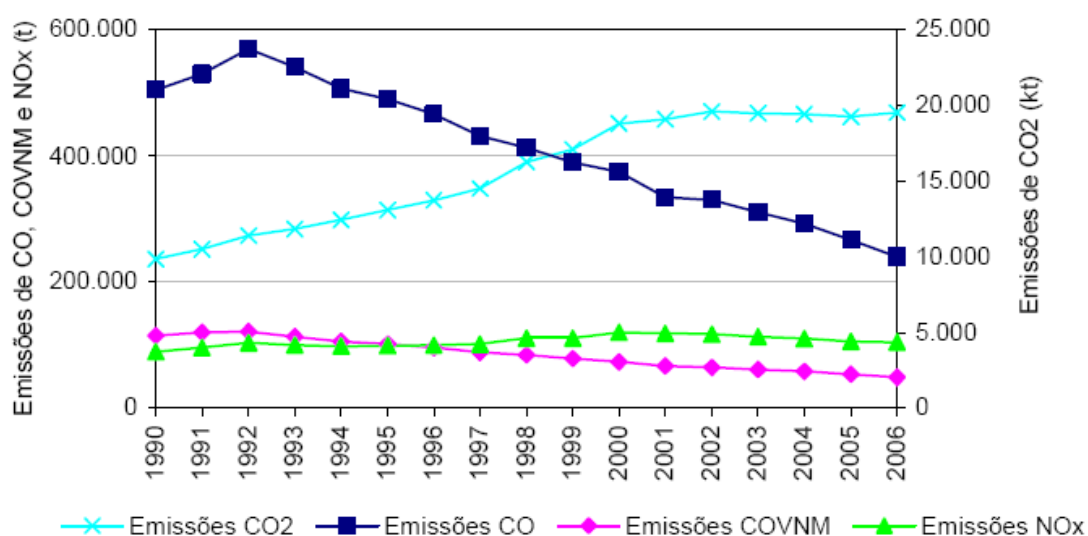


Figura 8: Evolução das emissões de CO, COVM, NO_x e CO₂ em Portugal [APA, 2008b].

O sector dos transportes é responsável pela maior contribuição das emissões de NO_x e de CO, tendo estas representado cerca de 38,7% e 37,5% dos totais de 2007, respectivamente. Apesar do acentuado crescimento do sector dos transportes rodoviários desde os anos 90, a introdução no mercado dos motores dos veículos ligeiros com catalisadores e a introdução de normas mais restritas no que diz respeito às emissões nos veículos a gasóleo, foi possível limitar as emissões destes poluentes e até mesmo diminuí-las. Desde 2000 que as emissões de NO_x têm apresentado uma tendência de diminuição, e as emissões de CO e de COVNM apresentaram reduções na ordem dos 55,2% e 63,2%, respectivamente, no período de 1990 a 2007. No entanto, a introdução dos catalisadores trouxe também algumas desvantagens, nomeadamente, a contribuição para emissões de CO_2 . Ainda assim, torna-se difícil avaliar em que medida as emissões de CO_2 aumentaram como resultado da introdução dos conversores catalíticos, uma vez que foram feitas melhorias na economia de combustível ao mesmo tempo que foram sendo desenvolvidos sistemas de optimização do motor necessários para minimizar as emissões de NO_x e de COV [Pereira *et al*, 2009].

2. METODOLOGIA DE CÁLCULO DE EMISSÕES

Uma estimativa precisa das emissões de poluentes dos transportes é uma medida necessária ao nível de vários contextos, tais como a monitorização de compromissos internacionais relativos à poluição do ar, o estudo de impactes de novos projectos rodoviários, a avaliação de políticas de transportes, ou até mesmo como dados de entrada em modelos de qualidade do ar [André *et al*, 2008].

A determinação das emissões de poluentes resultantes dos transportes para a atmosfera baseia-se na utilização de factores de emissão. Um factor de emissão é uma ferramenta que relaciona a quantidade de poluentes emitidos por uma determinada fonte com a actividade associada a essas emissões. Poderá ser expresso através da massa de poluente emitida em função da distância percorrida, a quente ou a frio, ou por unidade de tempo. Os factores de emissão são utilizados para estimar as emissões de uma determinada fonte através da seguinte equação geral:

$$E = A \times FE$$

onde, E são as emissões de uma determinada fonte durante o período considerado, A é a taxa de actividade de fonte de emissões e FE é o factor de emissão [EPA, 1997].

Uma vez que os factores de emissão poderão variar de acordo com, por exemplo, o tipo de veículo, a sua tecnologia e cilindrada, estes factores devem ser tidos em conta quando é determinada a distribuição do volume de tráfego. Os factores de emissão também irão variar em função da área geográfica (ex: urbana, rural), do tipo de estrada (ex: estrada urbana, auto-estrada) e do período de tempo considerado. Assim, existe a necessidade de definir a equação acima de acordo com estas considerações, ou de forma alternativa, de acordo com condições de tráfego generalizadas para assim definir como será obtida a distribuição do volume de tráfego [Boulter e McCrae, 2007].

Nos subcapítulos seguintes é feita, inicialmente uma descrição detalhada dos diferentes tipos de emissões existentes, seguida de uma apresentação de alguns dos principais modelos de cálculo de emissões dos transportes rodoviários actualmente utilizados e, posteriormente uma breve descrição dos princípios base de um modelo de transporte de quatro fases.

2.1 TIPOS DE EMISSÕES

As metodologias utilizadas para o cálculo das emissões distinguem-se entre as emissões calculadas para a fase de operação do motor termicamente estabilizado (a quente), e as emissões calculadas para fase do motor em aquecimento (a frio). Adicionalmente, são ainda distinguidas as metodologias para as emissões evaporativas, para o cálculo das emissões de COV's. É importante esclarecer que a palavra “motor” é utilizada em vez de “motor e qualquer dispositivo de pós-tratamento de exaustão”.

A distinção de emissões durante a fase estável e a fase de aquecimento é necessária devida à diferença substancial que existe nas taxas de emissões do veículo durante estas duas condições. As emissões da maior parte dos poluentes durante a fase de aquecimento do motor é muitas vezes superior do que na fase termicamente estabilizada sendo então necessária uma aproximação metodológica diferente para estimar as emissões durante este período. Deste modo, as emissões totais de um determinado poluente podem ser determinadas através da equação:

$$E_{total} = E_{quente} + E_{frio} + E_{evap}$$

onde, E_{total} são as emissões totais (g) de qualquer poluente para a resolução espacial e temporal da aplicação, E_{quente} são as emissões (g) durante a fase termicamente estabilizada do motor, E_{frio} são as emissões (g) durante a fase de transição térmica do motor, ou seja, durante o seu aquecimento [EEA, 2007a] e E_{evap} são as emissões (g) que são libertadas por evaporação. Cada um deste tipo de emissões é explicado a seguir em mais detalhe.

Emissões a quente

As emissões a quente dependem de uma variedade de factores, incluindo a distância percorrida por cada veículo, a sua velocidade (ou tipo de estrada), a sua idade, a cilindrada do motor e o peso do veículo [EEA, 2007a]. As emissões de poluentes relacionadas com a velocidade, para um motor a quente (E_{quente}) são calculadas do seguinte modo [Reynolds *et al*, 2000]:

$$E_{quente,p,v,y,l,g,s,f} = FE_{quente,p,v,y,l,g,s,f} \times L_{troço} \times VT_{v,y,l,f}$$

onde, $E_{quente,p,v,y,l,g,s,f}$ são as emissões (em g) do poluente p , emitido por veículos da categoria v , fabricados no ano y , que conduzem numa estrada do tipo l , com uma inclinação média g , a uma velocidade média s , utilizando um tipo de combustível f com o motor a quente;

$FE_{quente,p,v,y,l,g,s,f}$ é o factor médio de emissão representativo (em g/km) para o poluente p , relevante para a categoria de veículos v , fabricado no ano y , que viaja numa via rodoviária com uma inclinação média g , utilizando um combustível do tipo f com o motor a quente;

$L_{troço}$ é o comprimento (em km) da secção da via rodoviária considerada;

$VT_{v,y,l,f}$ é o volume de veículos da categoria v , fabricados no ano y , que conduzem na estrada do tipo l , utilizando combustível do tipo f .

Emissões a frio

As emissões a frio, comparadas com as emissões a quente, resultam de emissões adicionais aquelas que seriam esperadas se todos os veículos funcionassem apenas com os motores termicamente estabilizados. À partida estas ocorrem em todas as categorias de veículos. No entanto, os factores de emissão apenas estão disponíveis ou podem ser estimados para veículos de passageiros a gasolina, a diesel e a GPL e, assumindo um comportamento semelhante ao dos veículos de passageiros, também podem ser estimados para veículos ligeiros de mercadorias, para que todas estas categorias possam ser abrangidas pela metodologia.

Um factor de emissão “relativo”, que corresponde à razão entre as emissões a frio e as emissões a quente, é utilizado e aplicado para a fracção de quilómetros em que se conduz com o motor a frio. Este factor poderá variar de acordo com as características climáticas. O comportamento de condução (variando o comprimento das viagens), tal como as condições climáticas afectam o tempo necessário para aquecer o motor e/ou o catalisador de modo a obter a porção da viagem que é feita com o motor a frio. Estes factores podem ser tidos em conta, mas mais uma vez a informação pode não estar disponível em todos os países de modo a que as estimativas consigam colmatar as lacunas identificadas [EEA, 2007a]. As emissões a frio (E_{frio}) são calculadas utilizando a seguinte expressão [Reynolds *et al*, 2000]:

$$E_{frio,p,v,y,l,g,s,f} = E_{quente,p,v,y,l,g,s,f} \times FER_{p,v,y,f},$$

onde, $E_{frio,p,v,y,l,g,s,f}$ são as emissões (em g) do poluente p , emitido por veículos da categoria v , fabricados no ano y , que conduzem numa estrada do tipo l , com uma inclinação média g , a uma velocidade média s , utilizando um tipo de combustível f com o motor a frio;

$FER_{p,v,y,f}$ é o factor de emissão “relativo” para o poluente p , relevante para a categoria de veículos v , fabricados no ano y , utilizando o tipo de combustível f [Reynolds *et al*, 2000].

Emissões Evaporativas

As emissões referidas acima são emitidas pelo tubo de escape dos veículos e são chamadas de emissões de exaustão. São causadas primariamente pela combustão incompleta. No entanto, o combustível também evapora do depósito e do sistema de distribuição de combustível. Estas são emissões evaporativas e incluem as perdas diurnas, por impregnação a quente, e as perdas em repouso e em andamento do veículo. As emissões diurnas ocorrem a partir da evaporação no sistema de distribuição quando o veículo se encontra parado e a temperatura ambiente aumenta. As emissões por impregnação a quente são causadas pelas temperaturas elevadas do motor e do depósito de combustível e podem ocorrer até cerca de uma hora depois do motor ser desligado. As emissões em repouso ocorrem quando o veículo se encontra parado e a temperatura ambiente é constante ou diminui, enquanto as perdas em andamento são causadas pela evaporação do sistema de distribuição de combustível enquanto o motor se encontra em funcionamento. As emissões evaporativas contribuem para as emissões de COV's e estão primariamente associadas a veículos movidos a gasolina uma vez que o octano é bastante mais volátil que o cetano. As emissões evaporativas são incluídas como emissões adicionais e são função da volatilidade do combustível utilizado, da temperatura ambiente absoluta e das alterações de temperatura, e das características de design do veículo. Para as emissões por impregnação a quente e em andamento também é importante considerar o padrão de condução [Reynolds *et al*, 2000]. Apesar deste tipo de emissões ainda serem relevantes para o cálculo das emissões totais, os veículos mais recentes já dispõem de sistemas de controlo das emissões evaporativas que permitem minimizar bastante a libertação de poluentes dos transportes por evaporação [Schager, 2003].

2.2 MODELOS DE EMISSÕES

O objectivo principal dos modelos de emissões consiste em quantificar as emissões dos transportes a nível local, regional ou nacional. Estes modelos também permitem prever os efeitos nas emissões a partir das alterações no design ou na operação dos sistemas urbanos de transporte e assim avaliar estratégias para reduzir a poluição do ar. A obtenção de dados de entrada para o modelo de cálculo de emissões implica o conhecimento de diferentes parâmetros.

A caracterização destes parâmetros traduz-se numa grande sensibilidade no modelo de cálculo de emissões, na medida em que a disponibilidade e o modo de obtenção dos dados irão influenciar significativamente os resultados do modelo. Entre outros, os principais parâmetros dizem respeito aos seguintes pontos [\[Gilson e Favrel, 1997\]](#):

Tipos de emissões consideradas: emissões a quente, emissões a frio e emissões evaporativas com uma possível distinção mais detalhada entre emissões diárias, emissões por impregnação a quente e perdas em circulação;

Poluentes abrangidos: geralmente CO, CO₂, NO_x, HC e PM. Alguns modelos consideram até cerca de 254 poluentes;

Descrição da frota: categoria dos veículos detalhada, idade dos veículos para a diferenciação dos diferentes padrões de emissão, etc.;

Dados de tráfego: quilometragem dos veículos, fluxos de tráfego, numero de viagens, etc.;

Padrões de condução e condições de tráfego locais: (por exemplo: condução a baixa aceleração, condução do tipo para-arranca, inclinação das estradas, altitude da região) e forma como são consideradas: factores de emissão dependentes do tipo de estrada, factores de emissão dependentes da velocidade média ou factores de emissão expressos como função da velocidade instantânea e da aceleração;

Dados de saída: geralmente, as emissões e o consumo de combustível de uma forma mais ou menos desagregada para o período de tempo considerado.

Na Figura 9 é possível observar um esquema genérico com um resumo de um conjunto de variáveis e de parâmetros de cálculo intermédio que são necessários para o cálculo das emissões.

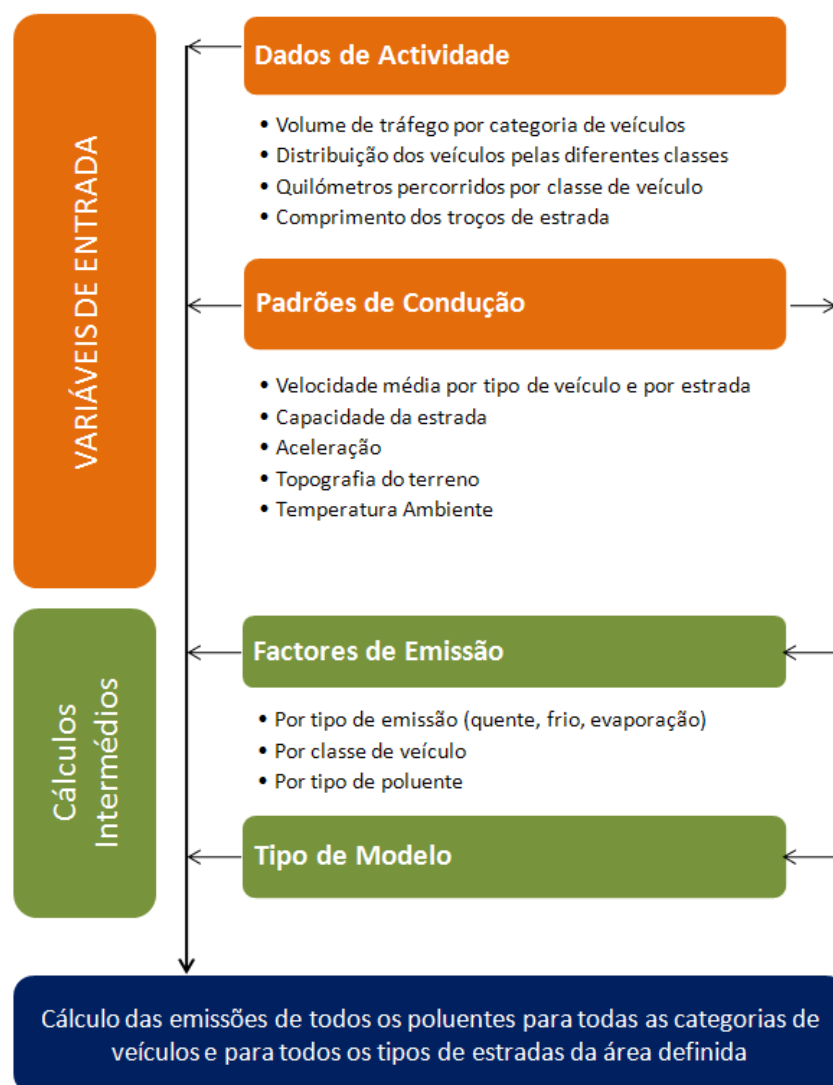


Figura 9: Esquema de relação entre os dados de entrada para o cálculo de emissões.

Os modelos para estimar emissões dos veículos rodoviários podem ser classificados de diversas formas, e os sistemas de classificação dos mesmos tendem a basear-se numa combinação da escala geográfica aplicada, do tipo genérico de modelo ou da natureza da abordagem ao cálculo de emissões. Também podem ser feitas distinções entre modelos que utilizam funções contínuas de emissões e modelos que utilizam valores discretos de emissões [Boulter *et al*, 2007]. Alguns tipos de modelos de emissões são discutidos nos subcapítulos seguintes.

2.2.1 Modelos de factores de emissão agregados

Os modelos de factores de emissão agregados operam ao nível mais simples, utilizando apenas um único factor de emissão para representar uma determinada classe de veículos em particular e

um padrão de condução geral. Normalmente, a distinção é efectuada entre estradas urbanas, rurais e auto-estradas. Os factores de emissão são estimados através de valores médios de medições num determinado número de veículos durante determinados ciclos de condução e agregados para cada tipo de estrada. São expressos em termos de massa de poluente emitida por veículo e por unidade de distância percorrida ($\text{g.veículo}^{-1}.\text{km}^{-1}$) ou por unidade de combustível consumido (g.l^{-1}). Dada a sua simplicidade, este tipo de modelos são mais frequentemente utilizados em aplicações com uma escala espacial mais vasta, como é caso dos inventários nacionais ou regionais, onde é requerida informação pouco detalhada sobre o regime de funcionamento dos veículos [Boulter *et al*, 2007].

2.2.2 Modelos de Velocidade Média

As funções para o cálculo de emissões dos transportes rodoviários considerando a velocidade média são largamente aplicadas em modelos de emissões à escala locais/regional. Os modelos que consideram a velocidade média baseiam-se no princípio de que o factor de emissão médio para um determinado poluente e para um determinado tipo de veículo varia de acordo com a velocidade média durante a viagem. O factor de emissão é novamente estabelecido em gramas por veículo e por unidade de distância percorrida ($\text{g.veículo}^{-1}.\text{km}^{-1}$). A Figura 10 exemplifica como uma função contínua de factores de emissão considerando a velocidade média é ajustada aos factores de emissão medidos para vários veículos em diferentes ciclos de condução, com cada ciclo a representar um tipo específico de condução, incluindo paragens, arranques, acelerações e desacelerações [Boulter *et al*, 2007].

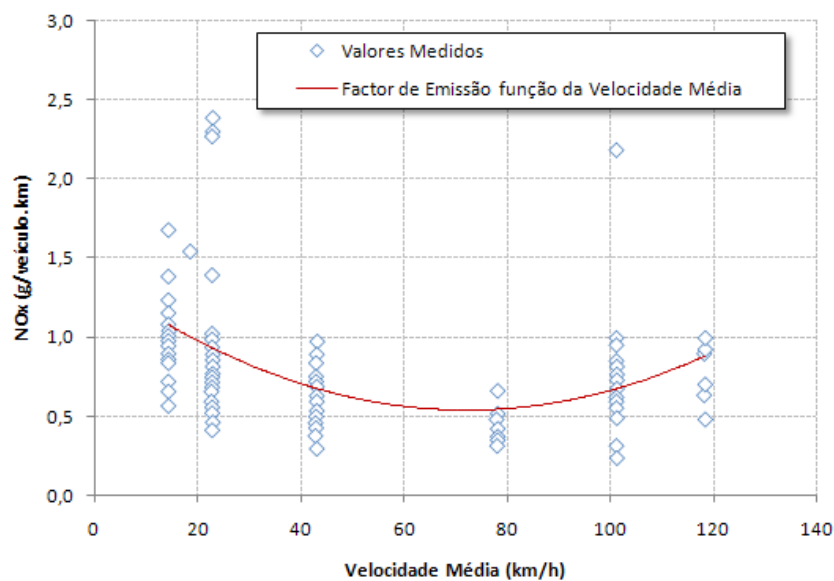


Figura 10: Factor de emissão de NO_x para veículos ligeiros de passageiros a gasóleo e para o limite de emissão EURO1 [Samaras e Ntziacharistos, 1998].

Apesar deste tipo de modelos ser largamente utilizado, consideram-se actualmente um conjunto de limitações associadas aos modelos de velocidade média. Viagens cujos padrões de condução sejam diferentes, podem ter a mesma velocidade média, mas terão certamente diferentes níveis de emissões, pelo que não deveria ser atribuído apenas um único factor de emissão para essa mesma velocidade. Outra limitação reside no facto deste tipo de modelos se ter tornado um indicador menos fiável na estimativa de emissões das novas gerações de veículos, isto porque, com os catalisadores modernos uma grande proporção do total das emissões de uma viagem podem ser emitidas em períodos muito curtos, que ocorrem muitas vezes aquando do manuseamento frequente da caixa de velocidades e em períodos de grande aceleração. Assim, a utilização deste tipo de dispositivos vem tornar bastante mais complicado prever as emissões. No fundo, os modelos de velocidade média acabam por criar uma aproximação à realidade que por vezes se torna demasiado simplista. Ainda assim, o facto de estes modelos serem de aplicação relativamente fácil, e permitirem obter uma correspondência razoável entre os dados de entrada necessários e a informação que normalmente se encontra disponível aos utilizadores, torna este conceito uma ferramenta bastante útil e prática comparativamente com outras metodologias [Boulter *et al*, 2007].

2.2.3 Modelos de Situações de Tráfego

Uma aproximação alternativa para incorporar tanto a velocidade como a dinâmica dos ciclos de condução na estimativa das emissões envolve a modelação de “situações de tráfego”, onde ciclos de taxas de emissão médias são correlacionados com vários parâmetros de ciclos de condução. Estes, por sua vez, referem-se a situações específicas de tráfego que são conhecidas pelo utilizador do modelo. Diferentes situações de tráfego relacionam-se com condições onde existe uma taxa de emissões específica, e para a qual a velocidade média poderá não ser o melhor indicador das emissões. Os modelos de situações de tráfego tendem a ajustar-se de forma mais razoável em aplicações locais, nas quais as estimativas das emissões se pretendem para troços de estrada individuais, porém também poderão ser utilizados em inventários regionais e nacionais.

Um exemplo deste tipo de modelo é o *Handbook of Emission Factors* (HBEFA) [INFRAS, 2004], utilizado na Alemanha, na Áustria e na Suíça, e que se baseia em factores de emissão de referência para cada categoria de veículos. Cada factor de emissão encontra-se associado a uma situação particular de tráfego, e às características do troço de estrada em causa (ex: “auto-estrada com limite de 120km/h”, “estrada principal fora da área urbana”). A variação da velocidade não é quantificada pelo utilizador, é sim definida através de uma descrição textual (ex: “circulação fluida”, “para-arranca”) do tipo de situação de tráfego ao qual se aplica o factor de emissão. Assim, tal como noutros modelos, os factores de emissão determinados pelo HBEFA para as várias categorias de veículos têm de ser ajustados de acordo com a situação do fluxo de tráfego [Boulter et al, 2007].

2.2.4 Modelos de Regressões multi-lineares

Alguns modelos empregam uma aproximação através de regressões multi-lineares segundo o método dos mínimos quadrados, baseando-se em testes num vasto conjunto de veículos em mais de cinquenta ciclos de condução diferentes. Um exemplo deste modelo é o VERSIT+ [Smit et al, 2005]. Neste modelo, cada ciclo de condução é caracterizado, não só pela velocidade média, mas também por parâmetros descritivos (ex: números de paragens por km). Para cada poluente e categoria de veículos um modelo de regressão é ajustado aos valores médios de emissão nos vários ciclos de condução, resultando na determinação de variáveis descritivas que correspondem à melhor previsão das emissões (sendo o grupo de descritores diferente para cada caso). Uma ponderação é aplicada a cada valor de emissão, com base no número de veículos testados em cada ciclo e na inter-dependência das variáveis dos ciclos. O modelo VERSIT+ requer um padrão de condução como informação de entrada, a partir do qual irá calcular a mesma gama de

variáveis descritivas e estimar as emissões baseando-se nos resultados das regressões. Tal como outros modelos que necessitam de um padrão de condução como informação de entrada, a utilização deste modelo será restringida a um número relativamente pequeno de utilizadores [Boulter *et al*, 2007].

2.2.5 Modelos de Emissões Instantâneos

Neste tipo de modelos os factores de emissão encontram-se atribuídos a modos específicos das condições de operação em que se encontram os veículos durante um determinado percurso.

Segundo Atjay e Weilenmann (2004), o objectivo dos modelos de emissões instantâneos consiste em registar medições de emissões através de testes em dinamómetros de chassis ou num motor de ensaio. As vantagens da utilização de modelos de emissões instantâneos são as seguintes:

- As emissões podem ser calculadas para qualquer perfil de condições de operação do veículo especificadas pelo utilizador do modelo, podendo assim ser gerados novos factores de emissão sem a necessidade de testes adicionais;
- Encontra-se inerente ao modelo a dinâmica dos ciclos de condução, podendo assim estes serem utilizados para explicar a variabilidade nas emissões associadas a determinadas velocidades médias;
- Os modelos permitem obter a resolução espacial das emissões, e assim apresentam potencial para conduzir a melhorias nas previsões da poluição do ar.

Alguns modelos instantâneos, em particular os mais antigos, relacionam o consumo de combustível e/ou as emissões com a velocidade dos veículos e com a aceleração durante o ciclo de condução, normalmente em intervalos de um segundo.

Nos modelos de emissões instantâneos mais simples, as taxas de emissões e de consumo de combustível são definidas para diferentes combinações de velocidade e de aceleração, normalmente através de uma matriz de dupla entrada. Para cada combinação de velocidade e de aceleração as taxas emissão ou de consumo de combustível baseiam-se em resultados de ensaios num determinado número de veículos sob diferentes ciclos de condução. Um exemplo de um modelo deste tipo é o MODEM [Jost *et al*, 1992; Joumard *et al*, 1995].

No entanto, é importante referir que existem alguns problemas associados aos modelos instantâneos. Por exemplo, é extremamente difícil medir emissões de forma contínua com um elevado grau de precisão, e por isso, não é completamente linear a correspondência das emissões medidas às condições de operação efectivamente observadas. Além disso, demonstrou-se que

durante as medições em laboratório, o sinal das emissões é detectado com um ligeiro atraso e é atenuado, tornando-se difícil fazer corresponder com rigor o sinal das emissões às condições de operação dos veículos.

Para se aplicarem os modelos instantâneos é necessário que sejam efectuadas medições das condições de operação do veículo e da sua localização de forma detalhada e precisa, caso contrário, não será possível tirar proveito dos benefícios do modelo. É muito provável que tal seja difícil para muitos utilizadores, devido ao facto de ser bastante dispendioso recolher essa informação. Assim, como consequência, a utilização de modelos instantâneos tem sido restringida apenas à investigação [Boulter *et al*, 2007].

2.3 MODELOS DE TRANSPORTE

Para poder efectuar estimativas das emissões dos transportes, um dos dados importantes como entrada no modelo de cálculo de emissões é o fluxo de transportes nos diferentes troços de estrada da área de estudo. Estes fluxos poderão ser obtidos através de contagem directa em vários locais da rede de estradas em análise ou então, como foi efectuado neste trabalho, através de uma estimativa obtida a partir de um modelo de transportes. A seguir serão explicados os conceitos associados a um modelo de transportes de quatro fases.

O modelo de transportes de quatro fases, utilizado frequentemente na modelação de transportes inclui as seguintes fases: Geração de Viagens, Distribuição de Viagens, Repartição Modal e Afectação. Estas fases, inicialmente são aplicadas de forma sequencial, podendo posteriormente ser accionadas de forma iterativa. Neste tipo de modelo, tal como em qualquer outro modelo, os primeiros passos iniciam-se com a recolha de dados e de informação, tal como também é necessária uma caracterização prévia das vias rodoviárias locais de forma a representar uma rede de estradas para a região em análise [Edwards e Jr., 1999]. A Figura 11 representa um esquema dos diferentes passos necessários para obter os fluxos de tráfego segundo o modelo de quatro fases.

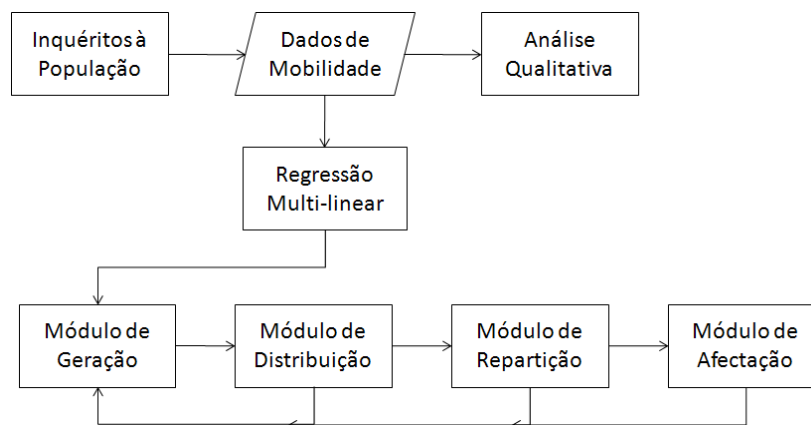


Figura 11: Diagrama do modelo de transportes de quatro fases [Meyer *et al*, 2001].

Geração de Viagens

A fase de geração de viagens permite gerar o número total de viagens que têm origem e destino em determinadas zonas da área de estudo. Esta estimativa é normalmente estratificada por objectivo de viagem e por isso baseia-se, quer nas características daquele que a realiza, como o tamanho do agregado familiar, o número de pessoas que trabalham ou o número de veículos existentes, quer no tipo de ocupação do solo, como características do sistema de transportes e o local onde se encontram as diferentes actividades. A estimativa da geração de viagens pode ser feita com recurso a inquéritos origem/destino às famílias e a indicadores de geração de tráfego que apresentam diferentes valores de viagens para determinados tipos de ocupação de solo [Edwards e Jr., 1999].

Distribuição de Viagens

Esta fase determina o trajecto pelo qual se distribuem as viagens geradas na fase anterior, ou seja, aqui são estimados todos os pares origem/destino possíveis de forma a constituir a matriz origem/destino. Esta distribuição é feita considerando a distribuição do emprego na zona de estudo definida [Pinto, 2006].

Repartição Modal

A repartição modal determina a proporção de viajantes que irão utilizar os vários modos de transporte disponíveis, como os transportes públicos, o automóvel privado, a bicicleta ou mesmo a pé. Estas proporções estão normalmente dependentes do nível do serviço existente por cada modo e das características socioeconómicas daqueles que realizam as viagens. Tal como nas fases

anteriores, também nesta fase, a escolha do modo de deslocação está relacionada com o objectivo de cada viagem [Edwards e Jr., 1999].

Afectação

A afectação determina o volume de tráfego associado a cada eixo da rede rodoviária por modo de transporte e/ou de forma agregada a partir da matriz origem/destino determinada anteriormente. Esta fase pode ser realizada através de dois métodos principais: (i) a atribuição tudo ou nada; (ii) o princípio de equilíbrio (de Wardrop). No primeiro método considera-se que todo o tráfego entre duas zonas utilizará o caminho mais curto, quer em tempo, quer em custo. Pelo segundo método, o de equilíbrio, cada condutor minimiza o respectivo tempo ou custo de viagem tendo em conta as condições de circulação conhecidas para a rede, em particular o facto do aumento de tráfego num determinado eixo implicar o tempo necessário para percorrer esse eixo [Pinto, 2006].

2.4 MODELO DE CÁLCULO DE EMISSÕES (TREM)

O modelo de cálculo de emissões utilizado neste trabalho designa-se por Transport Emission Model for Line Sources (TREM). Neste subcapítulo pretende-se fazer uma descrição da sua utilização, explicando em detalhe os diferentes passos necessários para a estimativa das emissões, desde a inserção dos dados de entrada no modelo até à obtenção dos resultados finais. Todos os parâmetros inseridos e resultados obtidos são caracterizados de forma a permitir a sua correcta análise e aplicação adequada no contexto geral deste trabalho.

2.4.1 Características gerais

O modelo TREM é uma ferramenta que serve de suporte à decisão na gestão da qualidade do ar que tem como principal objectivo, estimar as emissões do tráfego rodoviário com uma elevada resolução temporal e espacial. Este modelo permite-nos obter dados de emissões, dados esses que são importantes para servirem como dados de entrada em modelos fotoquímicos e de dispersão de poluentes, análise de efeitos na saúde e estudos de impacte e gestão da qualidade do ar. Além da estimativa das emissões do tráfego rodoviário, o modelo permite calcular os consumos de energia e de combustível que podem ser utilizados em diferentes tipos de aplicações.

O modelo TREM descreve as emissões dos veículos com base numa aproximação da velocidade média proposta pelos projectos MEET/COST319. Esta aproximação considera vários padrões de condução de forma indirecta através velocidade média. Os factores de emissão sugeridos pela metodologia foram obtidos a partir de dados recolhidos durante várias experiências europeias e baseados nas melhores curvas que correlacionam as medições de emissões com a velocidade. Esta metodologia é recomendada para velocidades médias acima dos 10 km/h e para aplicações em que a cinemática dos veículos não é relevante.

Neste modelo, as estradas são consideradas como fontes em linha, onde as emissões são calculadas individualmente para cada segmento de estrada. Para facilitar o processamento dos dados espaciais e para melhorar a conversão dos dados de emissões resultantes para um formato necessário para os modelos de qualidade do ar, o TREM encontra-se associado a um Sistema de Informação Geográfica (ArcView) [Tchepele, 2003].

A massa de poluentes emitida pelos veículos é estimada em dois passos:

- a) Determinação dos factores de emissão para cada tipo de veículo considerando a velocidade média;
- b) Estimativa da quantidade de poluentes emitida em cada troço de estrada baseado nos factores de emissão e na actividade dos transportes.

Este modelo pode ser utilizado para determinar as emissões dos seguintes poluentes:

- Monóxido de Carbono (CO);
- Óxidos de Azoto (NO_x), dados como NO₂ equivalente;
- Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos (COVNM);
- Dióxido de Carbono (CO₂);
- Dióxido de Enxofre (SO₂);
- Matéria Particulada (PM₁₀).

Adicionalmente às emissões de exaustão (quentes e frias), são também determinadas emissões evaporativas, os COV, e matéria particulada (resultante da utilização de travões e pneus, e de re-suspensão de partículas da estrada) conforme pode ser visualizado na Tabela 2.

Tabela 2: Tipos de emissões calculadas pelo modelo TREM para cada poluente [Tchepele, 2003].

Poluentes	Emissões a quente	Emissões a frio	Emissões evaporativas	Re-suspensão
CO	X	X		
NO _x	X	X		
COV	X	X	X	
CO ₂	X	X		
SO ₂	X			
PM ₁₀	X			X
Consumo de combustível	X	X		

Até se obterem as quantificações finais das emissões para cada poluente o modelo segue uma série de etapas indicadas a seguir. Na Figura 12 pode ser observado um esquema dos vários pontos de cálculo e as suas interações.

Diferentes etapas implementadas para o cálculo das emissões [Tchepele, 2003]:

Etapla 1: Leitura da informação de entrada dos ficheiros de texto criados na interface gráfica;

Etapla 2: O número total de veículos para cada troço é desagregado em classes e categorias de veículos;

Etapla 3: Os factores de emissão a quente (g/km), por veículo, para cada poluente são estimados em função da velocidade média no troço;

Etapla 4: O factor de emissão a quente total (g/km) para cada troço é calculado multiplicando os factores de emissão de cada classe de veículos pelo número de veículos da respectiva classe;

Etapla 5: A quantidade total (g) emitida em regime de motor a quente para cada troço de estrada é estimada multiplicando o factor de emissão global pelo comprimento do troço de estrada (km);

Etapla 6: A distância percorrida a frio (km) para veículos com e sem catalisador é estimada como função da temperatura ambiente e da velocidade média;

Etapla 7: A quantidade total de emissões a frio (g) durante as viagens a frio é calculada tendo em conta a temperatura ambiente e a velocidade média;

Etapla 8: A taxa de emissão a frio (g/km) é calculada para cada poluente assumindo uma distribuição uniforme ao longo da distância percorrida a frio;

Etapla 9: As emissões totais a frio são calculadas utilizando as taxas de emissão a frio e o número de veículos com e sem catalisador;

Etapla 10: As emissões totais para cada poluente e para cada troço de estrada são determinadas, como soma das emissões a quente e das emissões a frio.

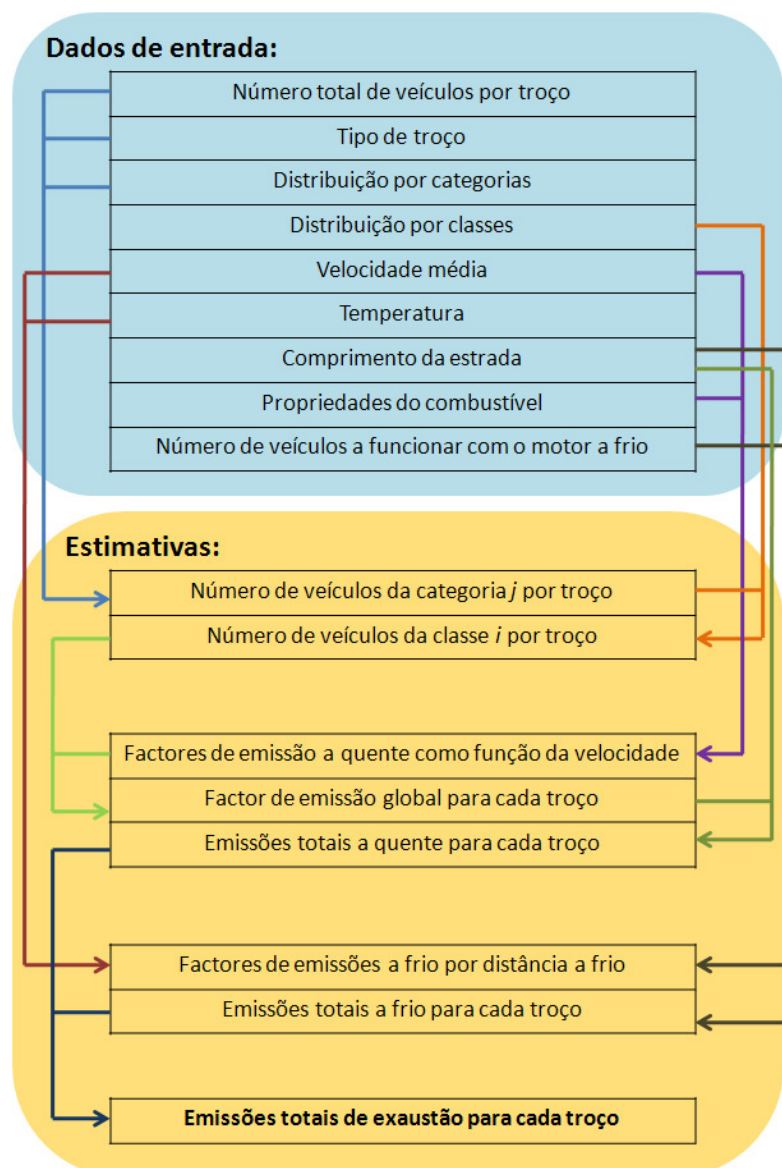


Figura 12: Esquema principal de cálculo de emissões pelo TREM [Tchepel, 2003].

2.4.2 Classificação dos veículos

As taxas de emissão dependem de vários factores, como o peso dos veículos, a potência dos motores, as tecnologias de redução das emissões, além de outros parâmetros. Por este motivo torna-se necessária uma agregação adequada dos diferentes veículos por categorias de forma a garantir uma estimativa coerente das emissões dos poluentes.

A informação acerca dos veículos é geralmente obtida através de sistemas de contagem de tráfego automáticos ou então os modelos de transporte que fornecem a informação referente aos fluxos de tráfego, embora não distingam as diferentes classes de veículos. Caso não exista

esta informação, os dados de fluxos de tráfego disponíveis por segmento de estrada podem ser cruzados com informação estatística que descreva a frota de veículos por unidade administrativa. De acordo com estas considerações, o TREM segue assim uma estrutura vertical para a classificação dos veículos conforme é indicado na Figura 13:

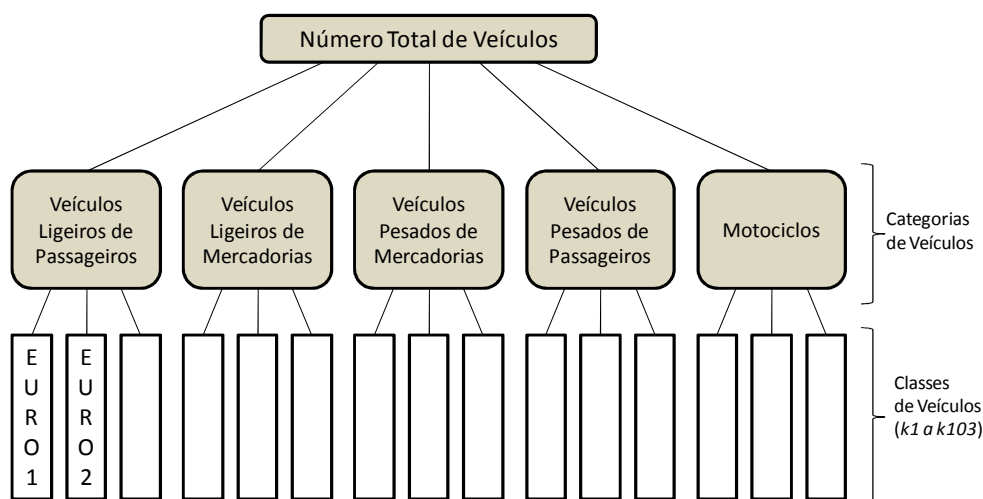


Figura 13: Classificação dos veículos no modelo TREM [Tchepel, 2003].

No modelo distinguem-se as seguintes categorias de veículos:

1. Veículos Ligeiros de Passageiros a Gasolina (PCg);
2. Veículos Ligeiros de Passageiros a Gasóleo (PCd);
3. Veículos Ligeiros de Passageiros a GPL (LPG);
4. Veículos Ligeiros de Mercadorias a Gasolina (LDVg);
5. Veículos Ligeiros de Mercadorias a Gasóleo (LDVd);
6. Veículos Pesados de Mercadorias a Gasóleo (HDV);
7. Veículos Pesados de Passageiros;
8. Motociclos;
9. Novas Tecnologias.

Adicionalmente às diferentes categorias descritas acima, o modelo tem implementado um conjunto de classes para uma classificação mais detalhada. No total, são distinguidas no modelo 103 classes de veículos (Anexo B). No TREM, cada classe de veículo é identificada através de um parâmetro k , que varia desde $k1$ a $k103$. Além disso, para atribuir as diferentes classes de

veículos, é utilizado o quadro do Anexo E com a indicação das datas de implementação dos diferentes limites de emissão associados às idades dos veículos.

A seguir são explicadas em detalhe as diferentes categorias de veículos distinguidas no modelo TREM [Tchepel, 2003]:

Os *Veículos Ligeiros de Passageiros* definem-se pelo facto de não excederem as 2,5 toneladas de peso e por serem utilizados para o transporte de passageiros. Este tipo de veículos é classificado de acordo com as seguintes características:

- 1) Tipo de combustível (Gasolina, Gasóleo, GPL);
- 2) Capacidade do Motor ($cc < 1,4$; $1,4 < cc < 2,0$; $cc > 2,0$);
- 3) Tecnologia (Limites de emissão).

Os Anexos B.1, B.2 e B.3 apresentam a classificação para os veículos ligeiros de passageiros (k1 a k41), reflectindo o progresso da legislação relativa à redução das emissões.

Os veículos utilizados para o transporte de bens e que tenham um peso máximo que não excedam as 3,5 toneladas são definidos como *Veículos Ligeiros de Mercadorias*. Este tipo de veículos encontra-se separado em veículos a gasóleo e a gasolina. As tecnologias de redução de emissões encontram-se implementadas na classificação dos veículos, incluindo um total de 10 classes (k42 a k51) quer para gasolina quer para gasóleo (Anexo B.4).

Os *Veículos Pesados de Mercadorias* são todos os veículos que são utilizados para o transporte de bens e mercadorias e cujo peso máximo seja superior a 3,5 toneladas. Com base no peso, estes veículos encontram-se agregados de acordo com as seguintes classes:

- Peso < 7,5 toneladas;
- $7,5 < \text{Peso} < 32$ toneladas;
- Peso > 32 toneladas.

Adicionalmente, este tipo de veículos encontra-se ainda dividido de acordo com os limites de emissão num total de 24 classes (k52 a k75). É assumido que todos estes veículos utilizam gasóleo como combustível.

Os veículos utilizados para o transporte de passageiros e que tenha mais do que nove lugares, incluindo o do condutor, correspondem à categoria dos *Veículos Pesados de Passageiros*. As

tecnologias de emissão consideradas nesta categoria encontram-se divididas em 12 classes (*k76 a k87*), conforme o Anexo B.5. Tal como na categoria anterior, também se considera que estes veículos apenas utilizam o gasóleo como combustível.

Os Motociclos são todos os veículos motorizados com menos de quatro rodas. Encontram-se categorizados como Ciclomotores, Motociclos a 2 tempos e Motociclos a 4 tempos. É ainda considerada a cilindrada do motor no caso dos Motociclos a 4 tempos. Encontram-se divididos em 9 classes (*k88 a k96*) de acordo com a tecnologia de redução de emissões.

Os veículos com *Novas Tecnologias* incluem os veículos eléctricos, híbridos e veículos movidos a células de combustível, encontrando-se separados em 7 classes (*k97 a k103*).

2.4.3 O TREM e a sua Ligação a Outras Ferramentas

A estrutura dos dados de entrada e de saída do modelo TREM foi desenhada de forma a permitir a sua ligação a Sistemas de Informação Geográfica (SIG), pelo que o formato de todos os dados se encontra em ficheiros compatíveis com a aplicação *ArcView*. Esta compatibilidade é importante para que os dados possam fluir sem problemas entre as diferentes aplicações, uma vez que assim se torna possível conjugar determinadas características dos dados, como é o caso das unidades, da resolução espacial e temporal e ainda os critérios utilizados para a agregação e desagregação da informação [Tchepel, 2003].

No *ArcView* a informação é armazenada de acordo com as suas características, ou seja, os objectos geométricos e as coordenadas são armazenados num tipo de ficheiro (*.shp), e a informação alfanumérica, como os comprimentos dos troços de estrada, as localidades, a identificação dos troços, etc., são armazenados noutro tipo de ficheiro (*.dbf). No caso do ficheiro do tipo *.dbf, cuja configuração se apresenta como uma grelha de dados, as linhas correspondem aos troços de estrada e cada coluna corresponde aos atributos desse mesmo troço. Por esse motivo, o TREM utiliza a sua informação de entrada directamente do ficheiro *.dbf e, após os cálculos, inclui os resultados obtidos adicionando novas colunas no ficheiro. Deste modo consegue-se assim preservar a informação original proveniente do *ArcView* e posteriormente utilizar a mesma aplicação para a visualização dos resultados das emissões [Tchepel, 2003].

É ainda importante referir que são também necessárias outras ferramentas de cálculo igualmente importantes às discutidas anteriormente. Os dados de volume de tráfego, velocidade média e capacidade das estradas são obtidos através do modelo de transportes e, além disso também é necessário utilizar folhas de cálculo do *MS Excel* para o tratamento dos mais variados dados estatísticos necessários para o cálculo das emissões. Estas ferramentas distinguem-se das anteriores simplesmente pelo facto de, muitas vezes, a informação se encontrar em ficheiros com formatos diferentes daqueles que são utilizados directamente pelo modelo de emissões ou pelo *Arcview*.

3. CASO DE ESTUDO

Neste Capítulo é feita uma aplicação da metodologia de cálculo de emissões, para os transportes rodoviários que circulam no município de Leiria utilizando o modelo TREM. A estimativa das emissões efectuada nesta parte do trabalho irá servir como base para um processo de modelação da qualidade do ar, representando a contribuição dos transportes na qualidade do ar local. Aqui é feita uma análise da quantidade de poluentes emitidos e da sua distribuição espacial e temporal.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O domínio de estudo escolhido para este trabalho foi o município de Leiria. A escolha desta zona para a quantificação das emissões associadas ao transporte rodoviário deveu-se ao facto de existir a possibilidade de obter um conjunto de informações relativas à caracterização do volume de tráfego de transportes rodoviários no município através de um estudo de mobilidade decorrido durante o mês de Novembro de 2007 no município e na cidade de Leiria. A quantificação das emissões desta região poderá então servir também com suporte para um estudo de qualidade do ar a realizar para a mesma região.

3.1.1 Definição da Área de Estudo

O concelho de Leiria encontra-se localizado na Região Centro do país, na Zona do Pinhal Litoral, estendendo-se numa área entre os 38° 38' 07" e os 39° 37' 49" de latitude Norte e os 8° 58' e os 8° 37' 19" de longitude Oeste. Com uma área de 568,3 km² e constituído por vinte e nove freguesias [CCDRC, 2008] o concelho é confinado a Norte com o concelho de Pombal, a Este também com o de Pombal e Ourém, a Sul com o da Batalha e de Porto de Mós e a Oeste é limitado pelo concelho da Marinha Grande e pelo Oceano Atlântico (Figura 14).

A cidade de Leiria, sede de concelho e capital de distrito, fica a uma distância de 146 km a norte de Lisboa e de 72 km a sul de Coimbra, sendo a sua localização um dos principais elementos que concorre para o seu crescimento e desenvolvimento. A sua área urbana representa um importante nó rodoviário resultante do cruzamento de algumas das principais estradas do país, como o IC2, a A1, a A17, a A8 e as estradas EN 109, 242 e 113 [CML, 2008].



Figura 14: Município de Leiria.

3.1.2 Características Demográficas

Segundo os dados do Instituto Nacional de Estatística (INE), o total da população residente no concelho de Leiria no final de 2007 é de 127 919 habitantes, tendo-se verificado um crescimento de cerca de 6,7% desde 2001. A distribuição das idades da população residente do concelho de Leiria, visível na Figura 15 c), evidencia claramente que a população do município é na sua maioria constituída por pessoas com idades compreendidas entre os 24 e os 64 anos [INE, 2008b]. A forte representatividade de indivíduos dentro desta faixa etária revela o carácter de actividade inerente à região do concelho de Leiria, sendo esse facto potenciador de uma maior mobilidade no concelho. O tipo de actividades da população residente [Figura 15 b)] revela que a maior parte da população, cerca de 60%, trabalha nos sectores da indústria, construção e comércio, espalhados de forma dispersa pelo município [Pinto *et al*, 2008]. A Figura 15 a), relativa à densidade

populacional do concelho, demonstra o carácter de centralidade do município focalizado na zona urbana junto à cidade de Leiria, com cerca de 36% da população a residir na zona urbana do concelho, tornando-se depois relativamente disperso no que diz respeito às restantes freguesias do concelho.

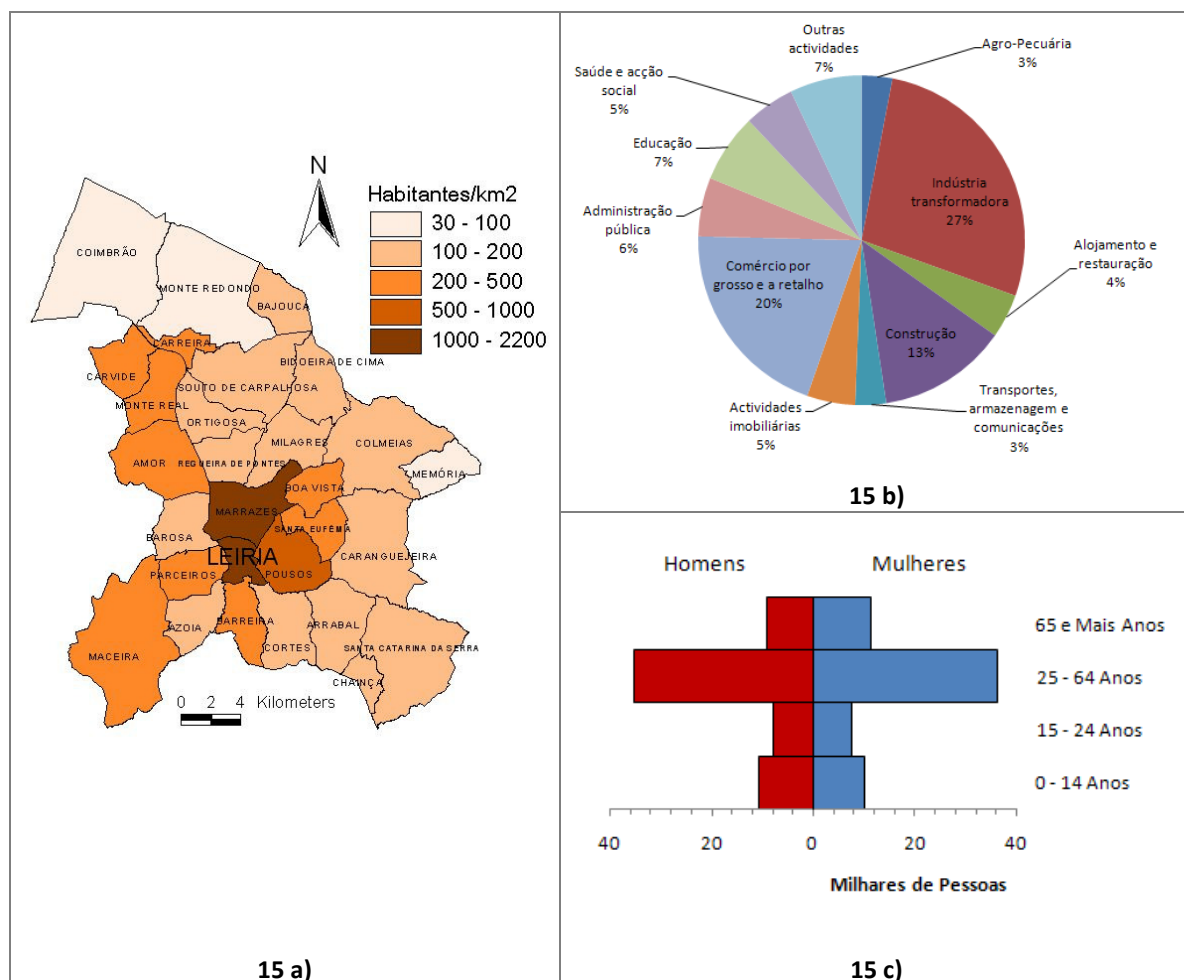


Figura 15: Indicadores estatísticos do Concelho de Leiria [INE, 2008b]. **15 a)** Densidade populacional em 2001. **15 b)** Sectores de actividade da população residente em 2001. **15 c)** Idades da população residente em 2007.

3.1.3 Características da Mobilidade

O território abrangido pelo município de Leiria apresenta uma estrutura polarizada centrada na cidade de Leiria, capital de distrito e sede de uma série de serviços, não só da administração local e regional, como também de serviços privados que servem a região envolvente do município [Pinto *et al*, 2008]. Este forte índice de actividade do município leva a que diariamente várias pessoas residentes, quer dentro da sua área, quer nos concelhos periféricos ou mesmo em zonas

mais distantes, se deslocam, tanto para a região como para fora desta. O facto de 57% da população residente demorar menos de 15 minutos nas suas deslocações (Figura 16), sugere que em grande parte dos casos, os habitantes do concelho de Leiria se deslocam apenas no interior do concelho. No entanto, é importante considerar que, uma grande proporção das viagens realizadas nesta região terá como origem os concelhos periféricos.

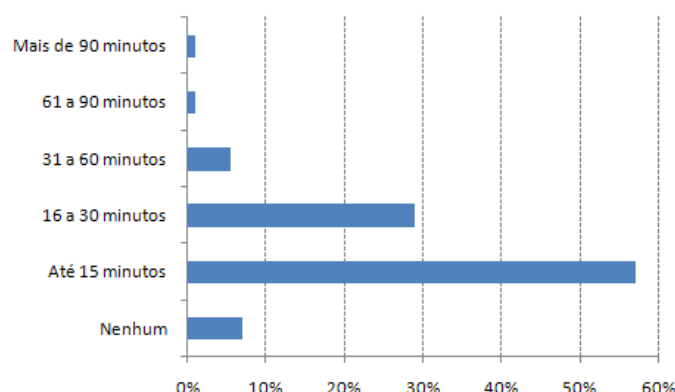


Figura 16: Duração dos movimentos pendulares da população do município em 2001 [INE, 2008b].

A Figura 17 permite verificar que a maior parte das deslocações das realizadas pelos habitantes do município são efectuadas em transportes particulares (cerca de 61%), quer seja como condutor ou como passageiros. Verifica-se também que apenas 9% da população residente utiliza os transportes públicos.

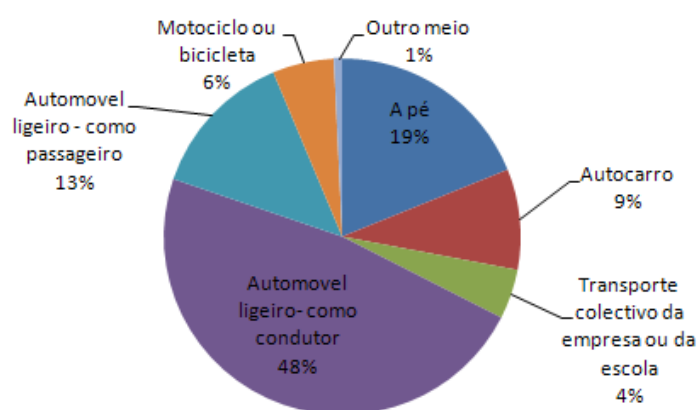


Figura 17: Modos de transporte no Município de Leiria em 2001 [INE, 2008b].

Depois de caracterizada a região no que diz respeito aos aspectos geográficos, demográficos e de mobilidade, importa então compreender como será utilizada a informação necessária para o

cálculo das emissões e como será implementado o modelo de cálculo á informação reunida que caracteriza a área de estudo.

3.2 APLICAÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO

Nesta fase do trabalho procedeu-se à aplicação do modelo TREM para quantificar as emissões na área de estudo definida. Aqui são discutidos os dados que foram utilizados como informação de entrada no modelo, ainda que muita dessa informação não tenha sido inserida directamente no modelo, tendo sido necessário efectuar alguns cálculos intermédios. A Figura 18 resume a ligação existente entre os vários tipos de informação inseridos no modelo de cálculo, bem como as suas fontes e ferramentas utilizadas.

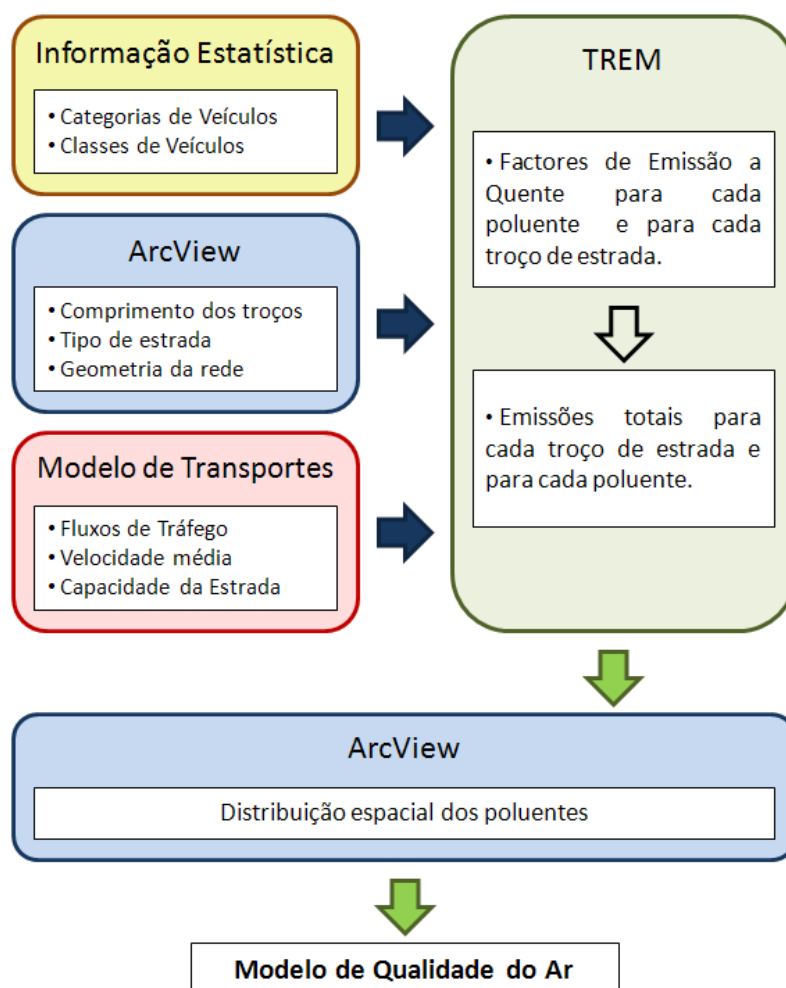


Figura 18: Ligação entre as várias ferramentas de modelação das emissões.

3.2.1 Recolha de Dados

Os dados recolhidos para a quantificação das emissões e para a caracterização da área de estudo foram obtidos através das mais variadas fontes. A informação utilizada pode ser distinguida entre dois tipos de informação: informação geográfica e informação estatística sob a forma alfanumérica. Toda a informação geográfica utilizada neste trabalho (mapas com o diferente zonamento da região, rede de estradas modelada, nós de ligação dos troços de estrada) foi fornecida pelo Departamento de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria (DEC/ESTG), no âmbito do estudo de mobilidade que se encontra a ser desenvolvido. As fontes de informação encontram-se sintetizadas na Tabela 3.

Tabela 3: Fontes da informação obtida para a área de estudo.

Informação	Fonte
População Residente	INE
Caracterização do Parque Automóvel por tipo de Combustível	[Pereira, 2009]
Caracterização da Idade e do Número de Veículos	ACAP
Consumo de Combustível	DGGE
Matriz Origem/Destino	DEC/ESTG
Contadores de Tráfego	EP
Fluxos de Tráfego nos Vários Troços da Rede	DEC/ESTG

3.2.2 Definição do Zonamento e Análise da Mobilidade

A área de estudo analisada neste trabalho foi dividida em duas zonas principais, conforme é apresentado na Figura 19. Esta divisão seguiu os mesmos critérios que a divisão efectuada no estudo de mobilidade efectuado pelo DEC/ESTG [Pinto *et al*, 2008], tendo como diferença, ter sido restringida apenas à área abrangida pelo município de Leiria. Deste modo torna-se possível garantir a compatibilidade entre os resultados obtidos entre o estudo de mobilidade e a modelação das emissões. A definição do zonamento teve em conta critérios como a homogeneidade de utilização do solo, a localização de pólos geradores de viagens, o acesso à rede rodoviária que serve o território e o acesso à cidade de Leiria. No território de estudo foi distinguida a Zona Urbana de Leiria, com base na estrutura urbana de Leiria e na estrutura das zonas envolventes a esta, e o restante município encontra-se definido pelas freguesias exteriores à Zona Urbana de Leiria ou apenas partes destas.

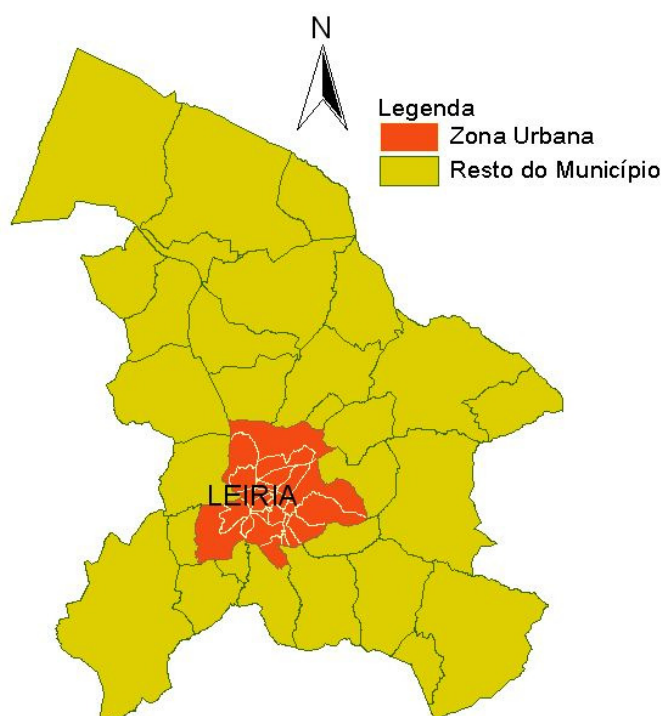


Figura 19: Definição do zonamento da área de estudo.

Os padrões de mobilidade observados no domínio de estudo definido anteriormente, baseiam-se na determinação de uma matriz origem/destino para o território em causa, através da estimativa do número de viagens, a partir de inquéritos telefónicos.

A informação fornecida foi obtida por regressão multi-linear em que se relacionaram dados referentes ao número total de viagens realizadas pelo agregado familiar no último dia útil anterior ao inquérito realizado no mês de Dezembro de 2007 e dados sobre o agregado, nomeadamente, dimensão, número de activos e número de automóveis propriedade do agregado [Pinto *et al*, 2008]. Uma porção da matriz origem/destino obtida pode ser observada na Tabela 4.

Tabela 4: Porção da Matriz Origem/Destino com o número de viagens realizadas.

		Destino							
		Hospital	Baixa	Câmara	Castelo	Estádio	Qta. da Seixa	Guimarota	Cruz d'Areia
Origem	Hospital	48	330	264	102	78	27	90	126
	Baixa	450	99	2118	483	624	93	111	309
	Câmara	231	1359	78	1086	183	114	72	375
	Castelo	165	573	2004	48	306	249	54	249
	Estádio	78	465	213	192	15	36	24	66
	Qta. da Seixa	24	57	108	129	27	6	12	33
	Guimarota	201	183	180	75	51	33	21	180
	Cruz d'Areia	300	540	1023	369	153	96	195	162

A matriz permite observar um equilíbrio entre origens e destinos por zonas, que reflecte o efeito das viagens pendulares. No caso da zona urbana de Leiria, a análise da matriz obtida revela que as zonas centrais da cidade apresentam um número de destinos bastante superior ao de origens, demonstrando a concentração de empregos e serviços nestas zonas. Também se observa que a parte do território municipal exterior à zona urbana da cidade tem uma importância significativa, na medida em que esta zona regista um elevado número de viagens quer com origem, quer como destino. Verificou-se assim que a zona central é tida como destino devido à concentração de empregos, sobretudo na área dos serviços, enquanto o resto do município é tido como destino pelo facto de ser local de residência de cerca de 64% da população desta região [Pinto *et al*, 2008].

3.2.3 Rede de Estradas

O município de Leiria apresenta um elevado grau de acessibilidade à sua sede de concelho que resulta de uma ocupação dispersa do território no que diz respeito à distribuição do emprego e das zonas industrializadas. A rede de infra-estruturas rodoviárias é composta por uma série de eixos rodoviários pertencentes às redes nacional e municipal que garantem não só uma ligação radial com a cidade de Leiria mas também uma série de conexões entre as sedes de freguesia e os núcleos urbanos de maiores dimensões. O elevado grau de conexão da rede aliado à ocupação urbana dispersa podem ser considerados como factores geradores da dispersão observada também na localização das actividades.

A rede rodoviária que serve a cidade de Leiria tem uma estruturação mista entre uma rede urbana, que serve a totalidade da cidade, funcionando na dependência funcional de uma rede colectora extra-urbana competência da administração central. A zona urbana da cidade é constituída por um anel circular exterior, composto pelo IC2 entre a localidade de Azóia e a freguesia de Boavista, passa pelo acesso à auto-estrada A1 e pelo futuro IC36 que ligará a A1 à A8. Existe também um segundo anel circular interior que proporciona a ligação entre as principais zonas residenciais, que actualmente suporta as cargas de tráfego que deveriam ser distribuídas pelo anel exterior [Pinto *et al*, 2008]. Como já foi referido anteriormente, a restante rede do município possui um conjunto de acessos importantes à cidade de Leiria constituído por algumas das estradas mais importantes do país, como as auto-estradas A1, A8 e A17, o IC2 e as estradas EN109, 242, 113. A afectação da matriz origem/destino à rede de estradas do município foi efectuada a uma rede modelada (Figura 20) que foi criada a partir da rede real que serve o território de estudo, tendo em conta as características de velocidade de circulação e a capacidade

dos arcos da rede. É de referir que a rede modelada considera também as vias previstas, embora a sua capacidade no presente seja indicada como nula [Pinto *et al*, 2008].

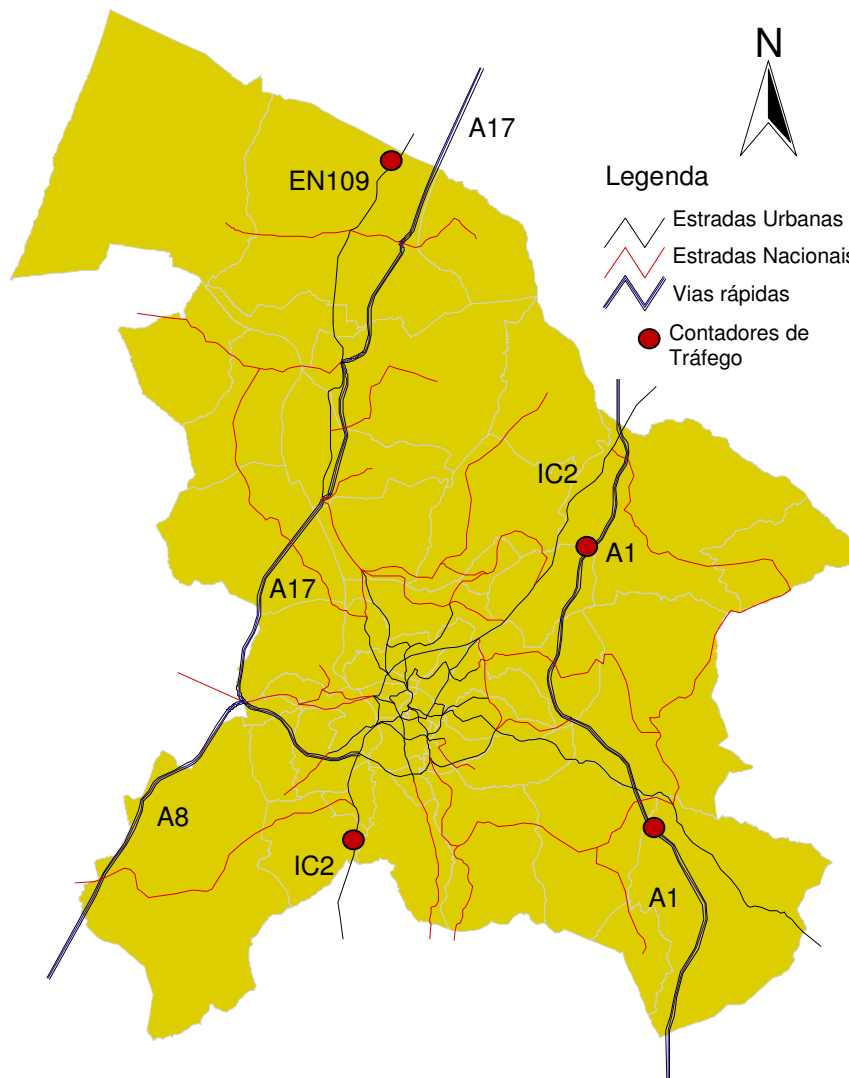


Figura 20: Rede de estradas modelada que serve o Município de Leiria.

3.2.4 Fluxos de Tráfego

Os fluxos de tráfego em cada troço de estrada do domínio de estudo foram determinados para a hora de ponta de um dia útil do mês de Novembro de 2007 através da afectação da matriz Origem/Destino à rede de estradas modelada tendo em conta as características de velocidade de circulação e de capacidade dos arcos da rede. Esta afectação de viagens à rede foi efectuada através de um modelo específico para o efeito, o *TransPlan*, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra [Antunes *et al*, 2003; Ferreira *et al*, 2002]. Esta

aplicação utiliza um método que considera a existência de um equilíbrio na escolha do melhor percurso, sendo este método designado por *Wardrop*.

A representatividade dos dados obtidos através deste modelo foi verificada pela comparação desses mesmos dados com informação estatística de contagem de tráfego disponível (Tabela 5). Para tal foram utilizados os dados de contadores automáticos de tráfego existentes na zona do domínio de estudo (Figura 20) e disponíveis no sítio da Internet das Estradas de Portugal (www.estradasdeportugal.pt). Os fluxos de tráfego foram comparados para a média um dia útil correspondente ao período de referência considerado para o estudo e apenas para os veículos ligeiros de passageiros, tendo-se verificado que os valores modelados se encontram próximos dos valores reais, embora ligeiramente inferiores.

Tabela 5: Comparação entre os fluxos de tráfego de veículos ligeiros de passageiros, obtidos através do modelo de transportes e dos contadores de tráfego, correspondentes à média de um dia útil do mês de Novembro de 2007.

Fluxo de tráfego no IC2 obtido pelo modelo de transportes (N.º de veículos)	Fluxo de tráfego no IC2 obtido pelo contador de tráfego (N.º de veículos)
13 645	14 219

Após a aplicação do modelo de cálculo de emissões aos fluxos obtidos, comparou-se o consumo de gasolina determinado pelo modelo com os valores estatísticos relativos ao consumo de combustível disponibilizados pela DGEG de forma a garantir a coerência da informação utilizada (Tabela 6). Tal como se verificou com a comparação entre os fluxos de tráfego, também no consumo de combustível se observaram valores ligeiramente inferiores obtidos pelo modelo em relação aos valores estatísticos, embora também relativamente próximos.

Tabela 6: Comparação entre os consumos de gasolina determinados pelo modelo de emissões e através dos valores estatísticos da DGEG, para o ano de 2007 e para o município de Leiria.

Consumo de gasolina determinado pelo modelo de emissões (ton)	Consumo de gasolina obtido através das estatísticas da DGEG (ton)
62 911	64 874

3.2.5 Composição da Frota

Para proceder ao cálculo das emissões através do TREM foi necessário proceder à caracterização da frota de veículos, no que diz respeito à sua distribuição pelas diferentes classes e categorias.

Uma vez que os fluxos de tráfego determinados através do modelo de transportes resultaram apenas do transporte de passageiros, a categoria de veículos pesados de mercadorias não foi considerada para o modelo de emissões.

Os veículos foram classificados tendo em conta as seguintes considerações [Pereira *et al*, 2009]:

- Os veículos ligeiros foram distribuídos entre veículos a gasolina (74,69%), veículos a gasóleo (24,88%) e veículos a GPL (0,44%).
- Os veículos ligeiros de passageiros a gasolina foram ainda separados em diferentes classes de acordo com a cilindrada do motor, tendo como base os valores estatísticos dos carros vendidos entre 1999 e 2006 [INE, 2008a], conforme é apresentado na Figura 21.

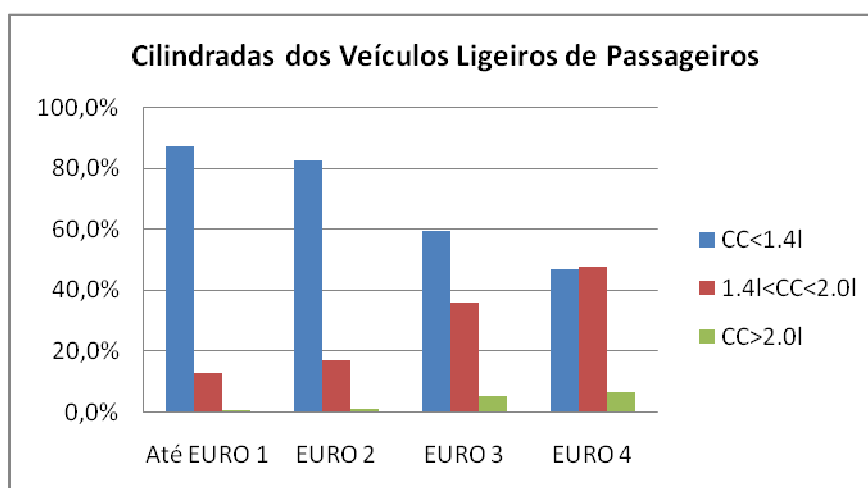


Figura 21: Cilindradas dos veículos ligeiros de passageiros em Portugal [INE, 2008a].

- Foi utilizada informação relativa à idade dos veículos para definir a correspondência entre a tecnologia dos veículos e os limites de emissão impostos na data de fabrico dos mesmos, conforme referido no subcapítulo 2.4.2, resultando na distribuição dos veículos pelas diferentes classes conforme pode ser visto no Anexo B. Para tal foram utilizados os dados da ACAP com a idade e o número de veículos do parque automóvel em Portugal relativos a Dezembro de 2006 (Tabela 7). Através destes dados foram atribuídas

diferentes percentagens de veículos aos diferentes limites de emissão presentes no Anexo E.

Tabela 7: Distribuição por idades (%) dos veículos em circulação em Portugal em 31 de Dezembro de 2006 [ACAP, 2008].

Idade Média (anos)	Ligeiros de Passageiros	Ligeiros de Mercadorias	Pesados de Passageiros	Motociclos >50cc
Até 1 ano	4,7	5,8	4,1	7,2
De 1 a 2 anos	5,1	6,0	5,5	7,0
De 2 a 3 anos	5,1	6,1	4,5	9,9
De 3 a 4 anos	5,2	5,9	4,0	9,5
De 4 a 5 anos	6,5	7,0	5,0	10,7
De 5 a 10 anos	36,0	43,9	24,6	37,3
De 10 a 15 anos	25,9	20,0	19,9	14,6
De 15 a 20 anos	9,8	4,8	16,7	3,7*
Mais de 20 anos	1,7	0,7	15,7	

*Mais de 15 anos

- As diferentes categorias de veículos foram associadas a diferentes tipos de estradas, nomeadamente, estradas *urbanas*, *inter-urbanas* e *auto-estradas*. A distinção entre as estradas foi efectuada de acordo com a velocidade máxima permitida da seguinte forma:

Tipo de Estrada	Designação	Critério
Tipo 1	Urbanas	Velocidade máxima até 50 km/h
Tipo 2	Inter-urbanas	Velocidade máxima até 90 km/h
Tipo 3	Auto-estradas	Velocidade máxima até 120 km/h

Posteriormente, a cada tipo de estrada foram associados as diferentes categorias de veículos que nelas circulam, sendo que a única diferença na distribuição pelos três tipos de estrada está relacionada com o facto de nas estradas do Tipo 3 não poderem circular motociclos com cilindrada inferior a 50 cm³. A distribuição dos veículos pelos diferentes tipos de estrada encontra-se nos anexos C.1 e C.2.

3.2.6 Variação Diária do Tráfego

As emissões obtidas através do modelo são determinadas para a hora de ponta, uma vez que os fluxos de tráfego também foram inseridos no modelo de acordo com esta referência temporal. Assim, para poder estimar as emissões diárias foi necessário conhecer a variação média dos fluxos

de tráfego ao longo de um dia do mês de Novembro (período de referência para o qual foram estimados os volumes de tráfego), de modo a poder determinar um factor de multiplicação que permitisse a extrapolação dos valores médios diários.

Dos valores médios de tráfego horários registados para cada dia útil do período de referência, em contadores automáticos de contagem de tráfego localizados no IC2 e na EN109 (Figura 20), resultou um perfil de variação de fluxos que pode ser observado na Figura 22. Este perfil será certamente diferente conforme o tipo de estradas da área de estudo, no entanto devido ao facto de apenas se disporem de dados estatísticos de contadores automáticos nestas estradas, apenas estas foram consideradas.

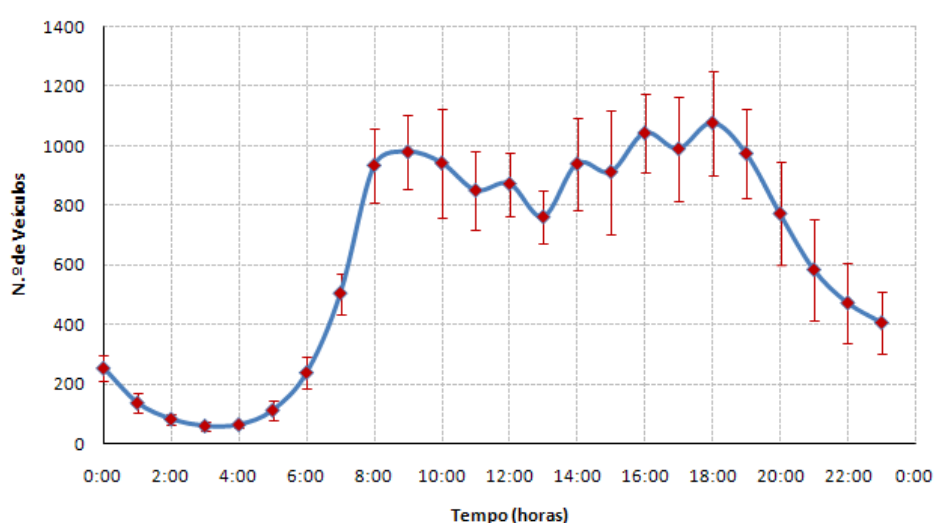


Figura 22: Perfil médio de variação dos fluxos de tráfego para um dia útil do mês de Novembro de 2007, no Município de Leiria.

O factor de multiplicação utilizado para a extrapolação das emissões determinadas para a hora de ponta foi calculado através da razão entre o volume de tráfego médio diário obtido neste perfil e o volume de tráfego na hora de ponta do mesmo perfil, considerando-se a hora de ponta aquela cujo volume de tráfego é o mais elevado.

3.3 RESULTADOS DO MODELAÇÃO DAS EMISSÕES

Neste subcapítulo são apresentados os resultados da quantificação das emissões obtidos através do modelo TREM, permitindo a sua observação para a área de estudo com diferentes resoluções espaciais. Posteriormente é feita uma análise às incertezas subjacentes às emissões estimadas de

forma a completar os resultados obtidos com informação que permita conhecer a precisão desses mesmos resultados.

3.3.1 Quantificação das emissões

O modelo TREM permitiu estimar as emissões para cada poluente, por troço e totais, a sua distribuição na área de estudo, para além de outros indicadores. Na Tabela 8 é possível observar as emissões diárias para a Zona Urbana de Leiria e para todo o Município. A sua análise permite destacar o facto das emissões por área e a taxa de emissões serem superiores para a Zona Urbana, demonstrando assim a enorme contribuição das áreas urbanas para as emissões pelos transportes rodoviários, embora as emissões por habitante sejam mais elevadas para o todo o município do que apenas para Zona Urbana.

Tabela 8: Resultados das emissões diárias para o concelho de Leiria.

Emissões Diárias em Novembro 2007	CO	CO ₂	NOX	PM*	SO ₂	COV
Emissões Totais (kg)						
Município de Leiria	14 966	944 377	3 017	258	167	2 977
Zona Urbana de Leiria	4 743	271 962	814	71	47	884
Emissões por habitante (g)						
Município de Leiria	117,0	7 382,6	23,6	2,0	1,3	23,3
Zona Urbana de Leiria	102,2	5 860,2	17,5	1,5	1,0	19,1
Emissões por área (kg/km ²)						
Município de Leiria	26,34	1 662,32	5,31	0,45	0,29	5,24
Zona Urbana de Leiria	108,34	6 212,66	18,58	1,62	1,08	20,20
Taxa Média de Emissões (g/veículo.km)						
Município de Leiria	3,03	190,94	0,610	0,052	0,034	0,60
Zona Urbana de Leiria	3,80	218,07	0,65	0,06	0,04	0,71

*Apenas emissões de exaustão.

A observação da Figura 23, relativa à distribuição espacial das emissões de CO no município, também permite igualmente constatar que é nas vias de acesso à Zona Urbana da cidade e nas estradas inseridas no interior dessa mesma área que ocorrem as maiores emissões de poluentes para a atmosfera, acontecendo o mesmo para os restantes poluentes (Ver Anexo D). Nas mesmas Figuras é possível constatar que as emissões nas vias correspondentes às auto-estradas apresentam valores relativamente baixos quando comparados com os das vias urbanas, o que não seria de esperar, uma vez que as auto-estradas representam normalmente vias com fluxos de tráfego relativamente elevados. Este facto poderá dever-se em parte à não consideração das

viagens que ocorrem nessas vias mas que não têm nem como destino nem como origem o próprio município, uma vez que essa situação não foi tida em conta no modelo de transportes.

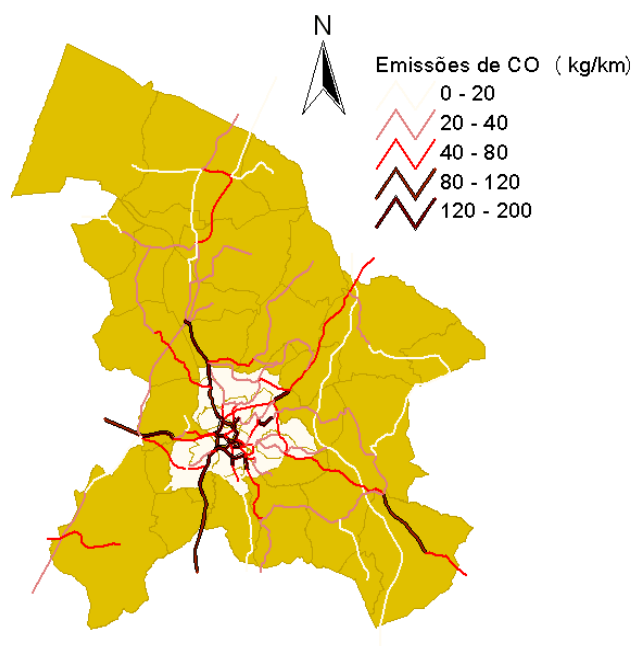


Figura 23: Distribuição espacial das emissões diárias de CO no Município de Leiria.

O TREM também permitiu calcular o consumo de combustível, mais concretamente o consumo de gasolina, tendo o valor final anual sido estimado em cerca de 60 mil toneladas. É importante referir que este valor deverá apresentar alguma incerteza uma vez que foi extrapolado a partir do valor mensal, assumindo o valor mensal como um valor médio, que seria igual para todos os meses do ano. Comparando este valor com os dados estatísticos da DGEG, em que o consumo de gasolina anual registado para 2007 no concelho de Leiria foi de cerca de 64 mil toneladas, verifica-se que os valores modelados se encontram bastante próximo dos valores estatísticos registados demonstrando assim a representatividade dos resultados obtidos.

O modelo TREM permitia ainda o cálculo das emissões com o motor a frio, no entanto, não existia informação disponível para a área de estudo, relativamente às distâncias percorridas com o motor a frio, que permitisse o cálculo destas emissões. Ainda assim é importante perceber que este tipo de emissões, adicionais às emissões com o motor a quente, representa uma contribuição significativa para o total das emissões, particularmente para poluentes como o CO e os VOC, cujas emissões são superiores durante as distâncias percorridas com o motor a frio [Tchepel, 2003].

É importante perceber que as estimativas obtidas são valores determinísticos e que, para serem analisados de forma fiável é necessário conhecer a precisão com que estes foram determinados. Nesse sentido, o cálculo das incertezas permite completar a quantificação das emissões, não de forma a pôr em causa a validade dos valores obtidos, mas sim ajudando a direccionar os esforços para uma melhoria da obtenção de resultados mais precisos no futuro e ajudando na tomada de decisões mais ponderadas. No subcapítulo seguinte foi efectuada uma análise das incertezas aos resultados obtidos no trabalho.

3.3.2 Análise das Incertezas

Ao modelar as emissões provenientes dos transportes, tal como na estimativa de qualquer outro problema ambiental, existe sempre uma incerteza associada. No caso da modelação das emissões, uma das fontes de incerteza poderá ser a abordagem da modelação em si, que no fundo procura descrever processos reais através de vários pressupostos baseados em conhecimentos, por vezes incompletos, dos processos de emissão. Outra fonte de incertezas está relacionada com os dados de entrada nos modelos [IPCC, 2006]. Além dos erros associados às medições e à falta de representatividade dos dados, os factores de emissão utilizados nos modelos são simplificações de situações que na realidade estão sujeitas a uma variabilidade elevada no que respeito à sua resolução temporal e espacial [EIIP, 1996]

O problema de não conhecer a incerteza associada a determinadas estimativas reside no facto dos cálculos determinísticos não fornecerem aos agentes decisores as indicações relativas à magnitude das incertezas subjacentes ao cálculo e de não permitirem conhecer as principais fontes de incerteza associadas. Por esse motivo, uma das abordagens possíveis para analisar os resultados de uma estimativa consiste em representar as incertezas existentes nos parâmetros de um modelo utilizando distribuições de probabilidade.

Algumas técnicas de simulação probabilísticas podem ser utilizadas para analisar a propagação de incertezas de parâmetros de entrada através do modelo determinando os seus efeitos combinados nos resultados de saída. Estas simulações permitem obter uma gama de valores para os parâmetros de saída do modelo e ainda informação sobre a probabilidade de obter diferentes resultados. Assim, esta aproximação probabilística pode ser utilizada para direccionar o esforço na procura de soluções onde ele é mais necessário [Frey, 1992].

Uma aproximação utilizada para analisar as incertezas é o método de Monte Carlo. Através deste método são utilizados valores gerados aleatoriamente para cada variável de entrada, obtidos a

partir da sua distribuição probabilística. Os valores gerados de cada variável são utilizados para calcular vários resultados de saída do modelo de emissões. A propagação dos vários cenários possíveis através do modelo, levam à obtenção de uma distribuição associada aos valores resultantes, que reflectem a incerteza ou a variabilidade dos parâmetros de entrada [Frey e Rhodes, 1999]. Analisando a função de densidade probabilística dos resultados do modelo de emissões, podem ser obtidos parâmetros como a média, o desvio padrão, o intervalo de confiança de 95%, bem como outras propriedades da função. Uma vez que esta estimativa é um método numérico, a precisão dos resultados costuma melhorar à medida que se aumenta o número de iterações [IPCC, 2006].

A aplicação do método de Monte Carlo no âmbito deste trabalho foi realizada tendo em conta a informação disponível relativamente aos dados de entrada. A informação acerca dos factores de emissão utilizados no modelo TREM encontrava-se sob a forma de factores de emissão médios em função da velocidade, dificultando a caracterização das incertezas associadas a esta fonte em termos probabilísticos, pelo que neste estudo apenas foi utilizada informação relativa aos dados de actividade. Para que os resultados obtidos fossem compatíveis com os dados fornecidos pelo estudo de mobilidade, o método foi aplicado apenas a veículos ligeiros de passageiros. Os vários passos seguidos para a aplicação do Método de Monte Carlo encontram-se apresentados na Figura 24.

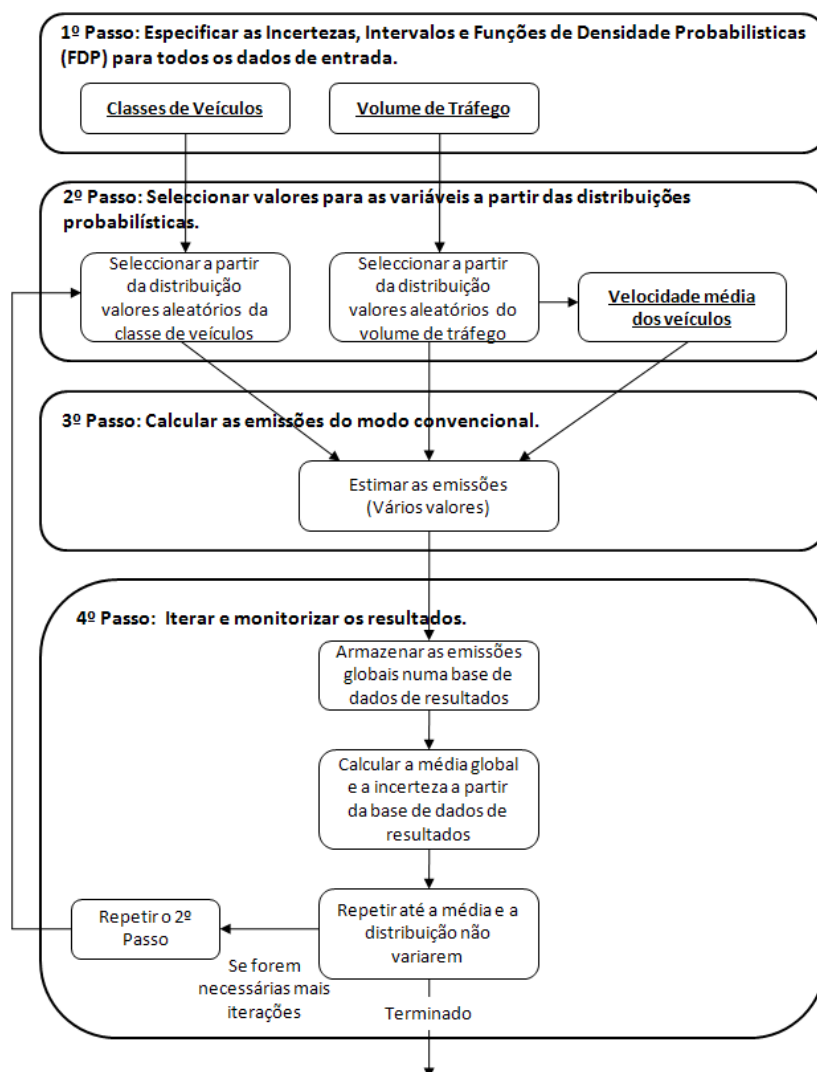


Figura 24: Representação esquemática da aplicação do Método de Monte Carlo neste estudo.

Inicialmente, foi utilizada a informação estatística relativa à distribuição dos veículos por classe para caracterizar as funções de densidade probabilística (FDP) correspondentes (Figura 25). Através destas funções foi possível gerar 100 valores aleatórios de cada classe para serem introduzidos no modelo TREM. Com base em valores de contagem de tráfego obtidos através de contadores automáticos localizados em estradas do domínio combinados com os valores resultantes do modelo de transportes foram gerados também 100 valores aleatórios de volume de tráfego para cada um dos troços existentes, para a hora de ponta dos dias úteis. Para esta estimativa foi utilizada informação dos contadores de tráfego referente aos dias úteis de um mês assumindo que poderia ser utilizada uma distribuição normal para descrever a variação horária de volume de tráfego. Desta forma foi possível caracterizar a variabilidade do volume de tráfego tanto em termos temporais, como em termos espaciais.

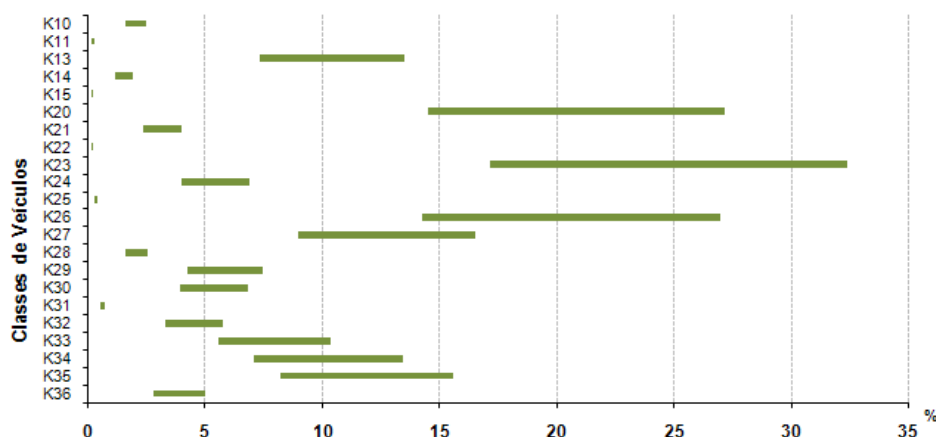


Figura 25: Distribuição das classes* de veículos representadas como intervalo [média-σ; média+σ].

* Veículos ligeiros de passageiros a gasolina: ECE-1503(k10–k12), ECE-1504(k13–k15), Euro1(k20–22), Euro2(k23–k25), Euro3(k26–28), Euro4(k29–k31); Veículos ligeiros de passageiros a gasóleo: pre-Euro1(k32), Euro1(k33), Euro2(k34), Euro3(k35), Euro4(k36).

A variabilidade da velocidade dos veículos foi também um parâmetro analisado como fonte de incerteza associada às emissões. A estimativa dos vários valores de velocidade gerados para dar entrada no modelo TREM foi realizada com base na capacidade das estradas e nos valores de volume de tráfego calculados previamente, através da seguinte expressão [Lomax et al, 1997]:

$$\text{Velocidade de Congestionamento} = \frac{\text{Velocidade de Circulação}}{(1 + 0,15[\text{Volume de Tráfego} / \text{Capacidade}]^4)}$$

A *velocidade de circulação* define-se para três tipos de estrada, nomeadamente, estradas urbanas (50 km.h⁻¹), estradas inter-urbanas (90 km.h⁻¹) e auto-estradas (120 km.h⁻¹). Assim, em função dos valores aleatórios de volume de tráfego, da capacidade das estradas e da velocidade máxima, foram calculadas as velocidades para cada troço de estrada na hora de ponta, podendo observar-se na Figura 26 a distribuição das velocidades médias para o domínio de estudo.

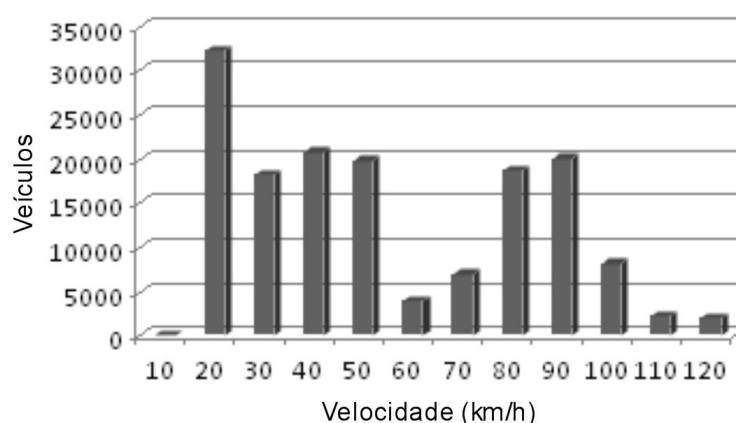


Figura 26: Distribuição da velocidade média dos veículos no domínio de estudo.

Os dados destas variáveis foram depois inseridos no TREM obtendo-se 10 000 valores aleatórios de emissões para cada troço de estrada, que resultaram da combinação dos vários valores gerados anteriormente para cada variável, permitindo assim conhecer a distribuição probabilística das emissões determinadas. Estes resultados foram analisados em termos de distribuição cumulativa e como intervalo de incerteza para as emissões horárias de CO, NO_x, COVNM e PM₁₀. Na Tabela 9 é possível observar os valores correspondentes às emissões horárias a quente dos veículos ligeiros de passageiros para o domínio de estudo, na hora de ponta, obtidos através das várias iterações. O intervalo de incerteza é apresentado relativamente ao valor médio como intervalo de confiança de 95% (valores entre o percentil 2,5 e o percentil 97,5).

Tabela 9: Emissões horárias para o domínio de estudo (kg.h⁻¹)

Poluente	Percentil 5	Percentil 50	Percentil 95	Mínimo	Máximo	Intervalo de incerteza (%) para um intervalo de confiança de 95 %	
						(-)	(+)
CO	755,61	791,86	829,03	733,65	853,61	-6,20	6,36
PM₁₀	1,47	1,58	1,67	1,42	1,79	-7,96	8,86
NO_x	126,78	137,81	147,69	123,10	155,30	-9,21	9,14
COVNM	57,48	63,63	69,51	55,02	74,02	-11,94	12,15

De entre os poluentes analisados, os COVNM são os que apresentam um maior intervalo de incerteza, seguidos dos NO_x, sendo o CO aquela cuja incerteza nos dados de actividade menos afecta os resultados finais.

É importante sublinhar que a incerteza das emissões apresentada na Tabela 9 resulta apenas da incerteza associada aos dados de actividade. No entanto, a incerteza associada aos factores de emissão poderá ser bastante significativa [\[Frey e Zheng, 2002\]](#) e, caso fosse considerada poderia aumentar substancialmente a incerteza global das emissões.

4. CONCLUSÕES

Os transportes continuam a ser uma das principais fontes de poluentes atmosféricos, trazendo consigo um vasto conjunto de consequências graves, quer para o ambiente, que para a saúde pública. Ainda que muitas metas se tenham conseguido alcançar no que diz respeito ao desenvolvimento de tecnologias capazes de reduzir as emissões de poluentes para a atmosfera, o forte crescimento verificado ao nível das infra-estruturas rodoviárias e o aumento do número de veículos em circulação, não só em Portugal, como no resto da Europa, têm dificultado a tarefa de reduzir os impactes dos transportes até níveis considerados aceitáveis para permitir uma qualidade do ar ambiente que se traduza numa qualidade de vida saudável para as populações em geral e em particular nos meios urbanos.

A modelação das emissões provenientes dos transportes, e neste caso em particular, do modo rodoviário e ao nível local/regional, constitui uma ferramenta chave para permitir quantificar a quantidade de poluentes emitida actualmente nos meios urbanos. Assim, a necessidade de cumprir com os requisitos legais estabelecidos para este sector deverá traduzir-se em tomadas de decisão importantes ao nível do planeamento de novas infra-estruturas rodoviárias e em novas estratégias políticas ao nível do sector dos transportes. Além disso, os resultados provenientes da modelação das emissões, constituem por si só, uma fonte de informação de grande importância para a sua aplicação noutras ferramentas, como é o caso dos modelos de qualidade do ar.

O principal objectivo deste trabalho consistiu na quantificação as emissões provenientes dos transportes rodoviários na região correspondente ao Município de Leiria, e o tratamento dos resultados obtidos com resoluções espacial e temporal adequadas à sua aplicação num modelo de qualidade do ar. O modelo TREM calcula as emissões através de factores de emissão baseados na velocidade média dos veículos, parâmetro este que descreve os vários padrões de condução. A aplicação deste tipo de modelos é a mais comum para o cálculo de emissões ao nível local/regional, devido à facilidade na obtenção dos dados de entrada requeridos, no entanto, este tipo de aproximação possui algumas limitações devido ao facto de se assumirem factores de emissão com base numa velocidade média que poderá ter origem em padrões de condução bastante distintos.

A aplicação do modelo de emissões requereu inicialmente a aquisição de um vasto conjunto de informação acerca dos dados de actividade do tráfego rodoviário na área de estudo. Torna-se importante compreender que nem sempre esses dados se encontram disponíveis na forma ideal para serem introduzidos no modelo. Muitos passos intermédios são necessários efectuar até que se obtenha a informação com as características adequadas para a sua aplicação directa, cálculos esses que se irão reflectir na incerteza dos resultados finais. Neste trabalho foram utilizados os resultados do modelo de transportes com o objectivo de caracterizar os fluxos de tráfego que tiveram como base inquéritos realizados à população, que só por si possuem alguma imprecisão inerente. A desagregação da informação relativa à caracterização do parque automóvel também introduziu incertezas devido ao cruzamento de informação estatística referente a períodos com algumas diferenças temporais ou mesmo diferenças relativas à sua distribuição espacial, ou seja, nem sempre os dados mais recentes eram referentes à mesma data e nem sempre a informação correspondia à mesma escala geográfica, tendo sido utilizados dados estatísticos nacionais para caracterizar situações restringidas apenas à escala municipal.

De forma a minimizar os factores de incerteza, tornou-se importante verificar a representatividade dos dados utilizados. Neste trabalho, os fluxos de tráfego utilizados para a estimativa das emissões foram validados com base na informação fornecida pelos contadores de tráfego (Ver subcapítulo 3.2.4) instalados nas estradas da região e também através da comparação do combustível consumido determinado pelo modelo de cálculo de emissões com os valores estatísticos disponibilizados pela DGEG, tendo-se verificado apenas uma diferença de cerca de 4% entre os fluxos obtidos estatisticamente e aqueles que foram efectivamente utilizados.

A aplicação do modelo TREM com os dados referentes à área de estudo resultou na estimativa das emissões para os poluentes, CO, CO₂, NO_x, PM₁₀, SO₂ e COVNM. Os resultados obtidos através do modelo apresentavam-se na forma de taxas de emissão, em gramas emitidos para cada troço de estrada e, neste caso em particular, para a hora de ponta, um vez que os fluxos de tráfego introduzidos correspondiam a este período. Estes resultados foram posteriormente agregados com diferentes resoluções espaciais e temporais para permitir uma melhor interpretação dos mesmos.

Em termos gerais, e para o período de referência considerado, o mês de Novembro de 2007, destaca-se o facto do CO₂ ser o poluente emitido em maior quantidade para a atmosfera, cerca de 944 377 kg, seguido pelo CO com um total de 14 966 kg. A análise da distribuição espacial dos poluentes permitiu constatar a forte contribuição da Zona Urbana de Leiria para o total das emissões do município, sendo que, em média, para cada poluente, as emissões na Zona Urbana de Leiria representam cerca de 29% das emissões totais do concelho. Este facto é reforçado através da constatação de que para todos os poluentes, tanto as emissões por área, como as taxas de emissão diárias, são superiores para a Zona Urbana relativamente ao total do município. A distribuição espacial dos poluentes pelas diferentes estradas do concelho evidencia também as principais vias de acesso à zona urbana como aquelas onde se apresentam as maiores contribuições na emissão de poluentes. Os valores obtidos acabam assim por se encontrar em concordância com as características de mobilidade identificadas na região de estudo, em que existe um grande fluxo de tráfego na região correspondente à zona urbana de Leiria, devido ao facto de ser nesta região do concelho que se encontra uma grande concentração de serviços e de empregos.

Este trabalho também permitiu determinar as incertezas associadas ao cálculo das emissões, sendo este um factor importante a considerar uma vez que limita a precisão e a exactidão da estimativa das previsões relacionada com a qualidade do ar. O conhecimento das funções de distribuição probabilística dos vários parâmetros de actividade que dão entrada no modelo, permitiu gerar valores aleatórios de modo a determinar vários valores de emissões, decorrentes de várias iterações, através do Método de Monte Carlo. Apesar de tudo, e uma vez que apenas foram utilizados dados de actividade, devido à dificuldade da caracterização da incertezas dos factores de emissão em termo probabilísticos, é importante reter, que este estudo não permite obter a incerteza global associada ao cálculo das emissões geradas pelos transportes rodoviários. Repare-se, por exemplo, que no caso das emissões de NO_x, o intervalo de incerteza proveniente apenas da incerteza relativa aos dados de actividade foi de cerca de 18% relativamente ao valor médio, pelo que este valor poderia ser ainda maior caso fossem consideradas as incertezas relativas aos factores de emissão.

A modelação de emissões de poluentes constitui sempre uma tarefa delicada e que deverá ser sempre efectuada com alguns cuidados, principalmente na aquisição dos dados de entrada dos modelos. Para que estudos como este pudessem ser mais completos e representativos da

realidade, seria importante caracterizar outros parâmetros importantes, inclusive através da sua medição no terreno, pelo que seria bastante útil a existência de contadores de tráfego em diferentes tipos de estrada e locais das zonas urbanas. Uma grande fonte de recolha de informação estatística para caracterizar de forma mais completa o parque automóvel, poderia passar pelos centros de inspeção automóvel. Dados como os quilómetros percorridos, a idade e a cilindrada dos veículos poderiam ser obtidos contribuindo de forma bastante mais completa, para as estimativas de emissões para inventários nacionais, regionais ou mesmo locais.

A melhoria da qualidade de informação dos dados de entrada nos modelos de cálculo de emissões viria assim contribuir para a redução das incertezas nas estimativas de emissões. No entanto, de forma a conseguir aplicar métodos de cálculo de incerteza mais eficazes e precisos, seriam também fundamental que a incerteza dos vários parâmetros de entrada fosse caracterizada aquando da obtenção dessa mesma informação.

A modelação das emissões de poluentes dos transportes é uma tarefa que requer a interligação entre várias ferramentas, desde os modelos de transporte, a informação estatística obtida das mais variadas formas, até à sua utilização como informação de entrada em modelos de qualidade do ar. Por esse motivo é importante que toda a informação utilizada possua o mínimo de incertezas associadas, ou pelo menos que estas sejam conhecidas, de forma a credibilizar os resultados obtidos, e assim permitir adoptar metodologias e decisões políticas e estratégicas de combate à poluição atmosférica cada vez mais eficazes.

5. BIBLIOGRAFIA

ACAP (2008): Página da Internet da Associação Automóvel de Portugal. Acedida em 18-08-2008, no endereço: www.acap.pt.

André M., Keller M., Sjödin A., Gadrat M., McCrae I. M. (2008): *The Artemis European Tools for Estimating the Pollutant Emissions from Road Transport and Their Application in Sweden and France*. 17th International Conference 'Transport and Air Pollution' 2008, Graz. pp 118-127.

Antunes, A. Seco, A., Pinto, N. (2003): *Na Accessibility-maximization Aproach to Road Network Planning*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering v. 18(3), pp. 225-241.

APA (2008a): *Evolução da Qualidade do Ar em Portugal entre 2001 e 2005*. Agência Portuguesa do Ambiente, Amadora.

APA (2008b): *REA 2007 Portugal – Relatório do Estado do Ambiente*. Agência Portuguesa do Ambiente, Amadora.

Atjay, D., and Weilenmann, M. (2004): *Compensation of the Exhaust Gas Transport Dynamics for Accurate Instantaneous Emission Measurement*. Environmental Science and Technology, Vol 38 (19), pp. 5141-5148.

Boulter P. G., McCrae I. (2007): *Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems – Final Report*. TRL Report No. UPR/IE/044/07. TRL Limited, Berkshire, United Kingdom.

Boulter P. G., McCrae I. S., Barlow T. J. (2007): *A Review of Instantaneous Emission Models for Road Vehicles*. Transport Research Laboratory. Report PPR 267.

CCDRC (2008): Página da Internet da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro. Acedida em 26-05-2008, no endereço: <http://www.ccdrc.pt/regiao/caracterizacao-indicadores>.

CE (2001): *Programa Ar Limpo para a Europa (CAFE): Para uma Estratégia Temática em Matéria de Qualidade do Ar*. Comissão das Comunidades Europeias, Bruxelas.

CE (2008): *Regulamento (CE) N.º 692/2008 da Comissão de 18 de Julho de 2008*. Comissão Europeia, Bruxelas.

CEC (2007): *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council Amending Directive 98/70/CE*. COM(2007) 18, Commission of The European Communities, Brussels.

CML (2008): Página da Internet da Câmara Municipal de Leiria. Acedida em Maio de 2008, no endereço: https://www.cm-leiria.pt/pagegen.asp?SYS_PAGE_ID=814281.

Confalonieri, U., B. Menne, R. Akhtar, K.L. Ebi, M. Hauengue, R.S. Kovats, B. Revich and A. Woodward (2007): *Human health. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 391-431.

DGEG (2009): Página da Internet da Direcção Geral de Energia e Geologia. Acedida em Abril de 2009, no endereço: www.dgge.pt.

Dora C., Phillips M. (2000): *Transport, Environment and Health*. World Health Organization Regional Publications. European Series, No. 89, Copenhagen, Denmark.

EC (2007): *Energy, Transport and Environment Indicators*. Eurostat. European Communities. Collection: Pocketbooks, Luxembourg.

Edwards J. D., Jr., P. E. (1999): *Transport Planning Handbook – 2nd Edition*. Institute of Transportation Engineers, Washington, USA.

EEA (2005): *Environment and Health*. EEA Report No. 10/2005, Copenhagen, Denmark.

EEA (2007a): *EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 2007*. Chapter 7 Road Transport. Technical Report No. 16/2007, Copenhagen, Denmark.

EEA (2007b): *Europe's Environment – The Fourth Assessment. Chapter 7 Sectors that Drive Environmental Change*. EEA Report No.1/2007, Copenhagen, Denmark.

EEA (2007c): *Transport and Environment: On the Way to a New Common Transport Policy*. European Environmental Agency. EEA Report No. 1/2007, Copenhagen, Denmark.

EEA (2008): *Air Pollution by Ozone Across Europe During Summer 2007*. EEA Report No. 5/2008, Copenhagen, Denmark.

EEA (2009): Página da Internet da Agencia Europeia do Ambiente. Acedida em Maio de 2009, no endereço: <http://www.eea.europa.eu>.

EIIP (1996): *Evaluating the uncertainty of emission estimates*. Emission Inventory Improvement Program, Final Report, v. VI, chapter 4, Research Triangle Park, North Carolina.

EPA (1997): *Procedures for Preparing Emission Factor Documents*. EPA-454/R-95-015. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina.

EPA (1998): *How Nitrogen Oxides Affect the Way We Live and Breathe*. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina.

EPA (2003): *National Air Quality and Emissions Trends Report – Chapter 2*. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions Monitoring and Analysis Division, Air Quality Trends Analysis Group, Research Triangle Park, North Carolina.

EPA (2006): *Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants*. EPA 600/R-05/004aF. U.S. Environmental Protection Agency. National Center for Environment Assessment-RTP Office, Research Triangle Park, North Carolina, USA.

EPA (2008): *Latest Findings on National Air Quality – Status and Trends through 2006*. EPA-454/R-07-007. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina, USA. pp. 8-13.

Ferreira, A., Antunes, A., Picado-Santos, L. (2002): *A Probabilistic Segment-linked Pavement Management Optimization Model*. Journal of Transportation Engineering ASCE 128(6), pp. 558-577.

Frey, H. C., (1992): *Quantitative Analysis of Uncertainty and Variability in Environmental Policy Making*. AAAS/EPA Environmental Science and Engineering Fellow and Research Associate Center for Energy and Environmental Studies Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.

Frey, H. C., Rhodes, D. S., (1999): *Quantitative Analysis of Variability and Uncertainty in Environmental Data and Models, Volume 1*. Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, USA.

Frey, H.C., and J. Zheng (2002): *Probabilistic Analysis of Driving Cycle-Based Highway Vehicle Emission Factors*. Environ. Sci. Technol. 36, 5184-519.

Gilson B., Favrel V. (1997): *Overview and Analysis of the links between «Models of Mobility» and «Models of Pollutant Emissions from Transport»*. Centre for Economic and Social Studies on the Environment. Université Libre de Bruxelles.

Gwilliam K., Kojima M., Johnson T. (2004): *Reducing Air Pollution from Urban Transport*. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, Washington, USA.

IA (2004): *Programa Para os Tectos de Emissão Nacional – Cenário de Cumprimento*. Instituto do Ambiente; Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, FCT/UNL; Centro de Estudos em Economia da Energia, dos Transportes e do Ambiente, CEEETA.

IMTT (2006): *O Sector dos Transportes na Economia Nacional*. Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres, I. P.

INE (2008a): *Estatísticas dos Transportes 2007*. Instituto Nacional de Estatística I. P., ISSN 1645-5401, Lisboa, Portugal.

INE (2008b): Página da Internet do Instituto Nacional de Estatística. Acedida em Setembro de 2008, no endereço: www.ine.pt.

INFRAS (2004): *Handbook of Emission Factors for Road Transport, Version 2.1*. INFRAS, Berne, Switzerland.

IPPC (2006): *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 1 General Guidance and Reporting, Chapter 3 - Uncertainties*. Institute for Global Environment Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan.

Jost, P., Hassel, P., Webber, F-J. and Sonnborn (1992): *Emission and Fuel Consumption Modelling Based on Continuous Measurements*. Deliverable No. 7, DRIVE Project V1053. TUV Rhineland, Cologne.

Joumard, R. Jost, P. and Hickman, J. (1995): *Influence of Instantaneous Speed and Acceleration on Hot Passenger Car Emissions and Fuel Consumption*. SAE Paper 960928. Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvania.

Krzyzanowski, M., Kuna-Dibbert, B. and Schneider, J. (2005): *Health Effects of Transport-related Air Pollution*. World Health Organization, Copenhagen, Denmark.

Lomax, T., Turner, S., Shunk, G., Levinson, H.S., Pratt, R.H., Bay, P.N. & Douglas, G.B. (1997): *Quantifying congestion (Volume 1, Final Report)*. National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC: National Academy Press.

Meyer, M. D. And Miller, J. (2001): *Urban Transportation Planning – 2nd Edition*. McGraw Hill, New York.

Pereira, T. C., Seabra T., Maciel H. e Torres P. (2009): *Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases, 1990-2007*. Agência Portuguesa do Ambiente, Amadora.

Pinto N. N. (2006): *Modelo de Transportes*. Engenharia de Tráfego e de Transportes, Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, Portugal.

Pinto N. N., Silva J. P., Pereira P. M. (2008): *Projecto Mobilidade Sustentável para o Município de Leiria, Relatório 1 – Diagnóstico e Princípios Orientadores de Intervenção*. Laboratório de Planeamento, Transportes e Sistemas de Informação Geográfica – Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, Portugal.

Reynolds A. W., Broderick B. M. (2000): *Development of an Emissions Inventory Model for Mobile Sources*. Transportation Research Part D. Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, Dublin, Ireland. pp. 77-101.

Roseiro, Maria N. V. (2003): *Poluentes Atmosféricos: Algumas Consequências Respiratórias na Saúde Humana*. Universidade de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil.

Samaras Z., Ntziacharistos L. (1998): *Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport – Average Hot Emission Factors for Passenger Cars and Light Duty Trucks*. LAT Report No. 9811, Thessaloniki, Greece.

Schager, M. (2003): *Automotive Evaporative Emissions Systems*. Electronic Journal for Engineering Technology, Volume 5, No. 1, University of Southern Colorado.

Acessível em: http://technologyinterface.nmsu.edu/5_1/5_1e/5_1e.html.

Smit, R., Smokers, R. and Schoen, E. (2005): *VERSIT+LD: Development of a New Emission Factor Model for Passenger Cars Linking Real-world Emissions to Driving Cycle Characteristics*. Proceedings of 14th International Symposium on Transport and Air Pollution Graz, Austria.

Tchepel O. A. (2003): *Modelo de Emissões para Apoio à Gestão na Qualidade do Ar*. Universidade de Aveiro. Tese de Doutoramento, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Aveiro, Portugal.

UE (2008): *Ambiente: Comissão regozija-se com a adopção final da directiva sobre a qualidade do ar*. IP/08/570, Bruxelas.

WBG (1998): *Nitrogen Oxides*. Pollution Prevention and Abatement Handbook – World Bank Group.

WHO (2003): *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide*. World Health Organization Working Group, Bonn, Germany.

WHO (2005): *Particulate Matter Air Pollution: How it Harms Health*. Fact Sheet Euro/04/05, World Health Organization, Berlin, Copenhagen, Rome.

WHO (2006): *Air Quality Guidelines – Global Update 2005, Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide*. World Health Organization, Copenhagen, Denmark.

Yu L., Jia S., Shi Q. (2008): *A Synthesis of Transportation Emissions Research: Current Status and Future Directions*. Center for Transportation Training and Research – Texas Southern University, Houston, Texas, USA.

6. ANEXOS

A. VALORES LIMITE DE CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES ESTABELECIDOS PELO DECRETO-LEI 111/2002 DE 16 DE ABRIL.

Os valores limite são expressos em microgramas por metro cúbico, normalizados à temperatura de 293K e à pressão de 101,3 kPa.

Valores limite para o dióxido de enxofre (SO ₂) no ar ambiente			
	Período Considerado	Valor Limite	Data de Cumprimento
Valor limite horário para protecção da saúde humana.	Uma hora	350µg/m ³ (valor a não exceder mais de 24 vezes em cada ano civil)	1 de Janeiro de 2005
Valor limite diário para protecção da saúde humana.	Vinte e quatro horas	125µg/m ³ (valor a não exceder mais de 3 vezes em cada ano civil)	1 de Janeiro de 2005
Valor limite para a protecção dos ecossistemas	Ano civil e período de Inverno (1 de Outubro a 31 de Março)	20µg/m ³	Data de entrada em vigor do diploma
Valores limite para o dióxido de azoto (NO ₂) e óxidos de azoto (NO _x) no ar ambiente			
Valor limite horário para protecção da saúde humana	Uma hora	200µg/m ³ NO ₂ (valor a não exceder mais de 18 vezes em cada ano civil)	1 de Janeiro de 2010
Valor limite anual para protecção da saúde humana.	Ano civil	40µg/m ³ NO ₂	1 de Janeiro de 2010
Valor limite para a protecção dos ecossistemas	Ano civil	30µg/m ³ NO _x	Data de entrada em vigor do diploma
Valores limite para as partículas em suspensão (PM ₁₀) no ar ambiente			
1ª fase Valor limite diário para protecção da saúde humana	Vinte e quatro horas	50µg/m ³ (valor a não exceder mais de 35 vezes em cada ano civil)	1 de Janeiro de 2005
1ª fase Valor limite anual para protecção da saúde humana.	Ano civil	40µg/m ³	1 de Janeiro de 2005
2ª fase Valor limite diário para protecção da saúde humana	Vinte e quatro horas	50µg/m ³ (valor a não exceder mais de 7 vezes em cada ano civil)	1 de Janeiro de 2010
2ª fase Valor limite anual para protecção da saúde humana	Ano civil	20µg/m ³	1 de Janeiro de 2010
Valor limite para o chumbo (Pb) no ar ambiente			
Valor limite anual para protecção da saúde humana	Ano civil	0,5µg/m ³	1 de Janeiro de 2005 ou 1 de Janeiro de 2010.
Valor limite para o benzeno (C ₆ H ₆)			
Valor limite anual para protecção da saúde humana	Ano civil	5µg/m ³	1 de Janeiro de 2010
Valor limite para o monóxido de carbono (CO)			
Valor limite anual para protecção da saúde humana	Máximo diário das médias de oito horas*	10mg/m ³	Data da entrada em vigor do diploma

*O valor máximo diário da concentração média por períodos de oito horas deve ser seleccionado pela análise das médias por períodos consecutivos de oito horas, calculadas a partir de dados horários e atualizados hora a hora. Cada média de oito horas assim calculada deve ser atribuída ao dia em que termina, ou seja, o primeiro período de cálculo para um dia determinado será o período decorrido entre as 17 horas do dia anterior e a 1 hora desse dia; o último período de cálculo para um dia determinado será o período entre as 16 e as 24 horas desse dia.

B. CLASSES DE VEÍCULOS SEGUNDO O TREM

B.1 Atribuição das classes para os veículos Ligeiros de Passageiros a Gasolina.

Classe	Capacidade	Código	%
PRE ECE	cc < 1.4 l	k1	0,00%
	1.4 l < cc < 2.0 l	k2	0,00%
	cc > 2.0 l	k3	0,00%
ECE 15 -00/01	cc < 1.4 l	k4	0,00%
	1.4 l < cc < 2.0 l	k5	0,00%
	cc > 2.0 l	k6	0,00%
ECE 15-02	cc < 1.4 l	k7	0,00%
	1.4 l < cc < 2.0 l	k8	0,00%
	cc > 2.0 l	k9	0,00%
ECE 15-03	cc < 1.4 l	k10	1,46%
	1.4 l < cc < 2.0 l	k11	0,21%
	cc > 2.0 l	k12	0,01%
ECE 15-04	cc < 1.4 l	k13	8,57%
	1.4 l < cc < 2.0 l	k14	1,22%
	cc > 2.0 l	k15	0,06%
Improved Convent.	cc < 1.4 l	k16	0,00%
	1.4 l < cc < 2.0 l	k17	0,00%
Open Loop	cc < 1.4 l	k18	0,00%
	1.4 l < cc < 2.0 l	k19	0,00%
EURO 1	cc < 1.4 l	k20	18,02%
	1.4 l < cc < 2.0 l	k21	2,57%
	cc > 2.0 l	k22	0,12%
EURO 2	cc < 1.4 l	k23	22,03%
	1.4 l < cc < 2.0 l	k24	4,49%
	cc > 2.0 l	k25	0,27%
EURO 3	cc < 1.4 l	k26	18,45%
	1.4 l < cc < 2.0 l	k27	11,10%
	cc > 2.0 l	k28	1,59%
EURO 4	cc < 1.4 l	k29	4,58%
	1.4 l < cc < 2.0 l	k30	4,65%
	cc > 2.0 l	k31	0,61%

B.2 Atribuição das classes para os veículos Ligeiros de Passageiros a Gasóleo.

Classe	Código	%
Conventional	k32	11,52%
EURO 1	k33	20,71%
EURO 2	k34	26,79%
EURO 3	k35	31,14%
EURO 4	k36	9,84%

B.3 Atribuição das classes para os veículos Ligeiros de Passageiros a GPL.

Classe	Código	%
Conventional	k37	11,52%
EURO 1	k38	20,71%
EURO 2	k39	26,79%
EURO 3	k40	31,14%
EURO 4	k41	9,84%

B.4 Atribuição das classes para os veículos Ligeiros de Mercadorias a Gasóleo.

Classe	Código	%
Conventional	K47	13,46%
EURO 1	K48	20,76%
EURO 2	K49	17,54%
EURO 3	K50	36,51%
EURO 4	K51	11,73%

B.5 Atribuição das classes para os veículos Pesados de Passageiros a Gasóleo.

Classe	Código	%
Conventional	k76	32,35%
EURO 1	k77	15,92%
EURO 2	k78	18,76%
EURO 3	k79	23,35%
EURO 4	k80	9,63%
EURO 5	k81	0,00%

B.6 Atribuição das classes para os Motociclos.

Classe	Capacidade	Código	%
Mopeds Conv.		k88	17,65%
Mopeds Stage 1		k89	33,28%
Mopeds Stage 2		k90	25,86%
Moto 2 Conv.		k91	1,31%
Moto 2 Stage 1		k92	2,47%
Moto 4 Conv	cc < 250 l	k93	6,73%
	250 l < cc < 750 l	k94	0,00%
	cc > 750 l	k95	0,00%
Moto 4 Stage 1		k96	12,69%

C. ATRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE VEÍCULOS POR TIPO DE ESTRADA

C.1 Atribuição dos diferentes tipos de veículos pelas estradas do Tipo 1 e 2.

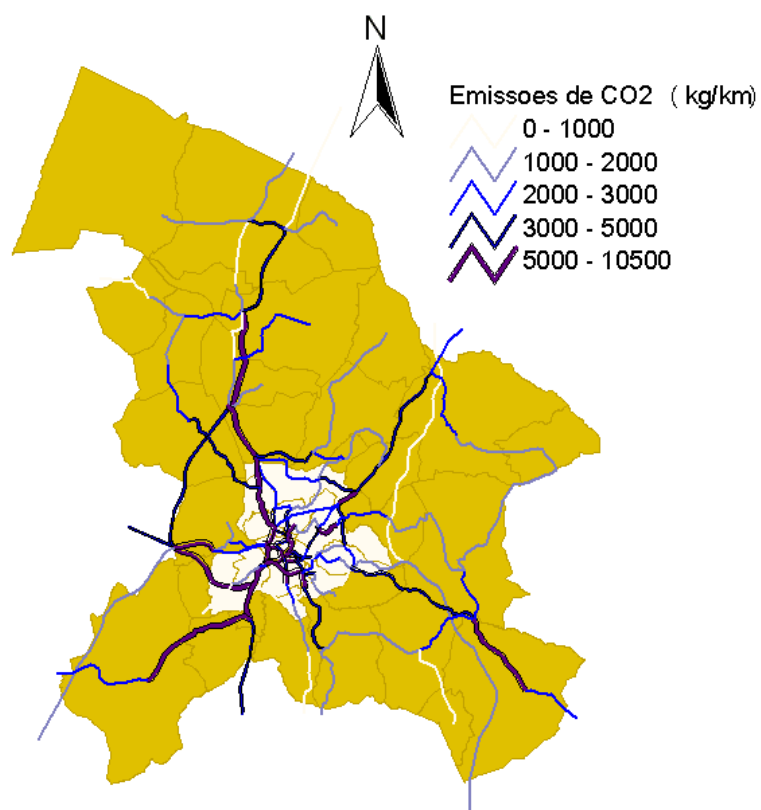
Categorias	%
Veículos Ligeiros de Passageiros a Gasolina	49,60%
Veículos Ligeiros de Passageiros a Gasóleo	16,52%
Veículos Ligeiros de Passageiros a GPL	0,29%
Veículos Ligeiros de Mercadorias a Gasóleo	22,26%
Veículos Pesados de Passageiros a Gasóleo	0,18%
Motociclos	11,16%

C.2 Atribuição dos diferentes tipos de veículos pelas estradas do Tipo 3.

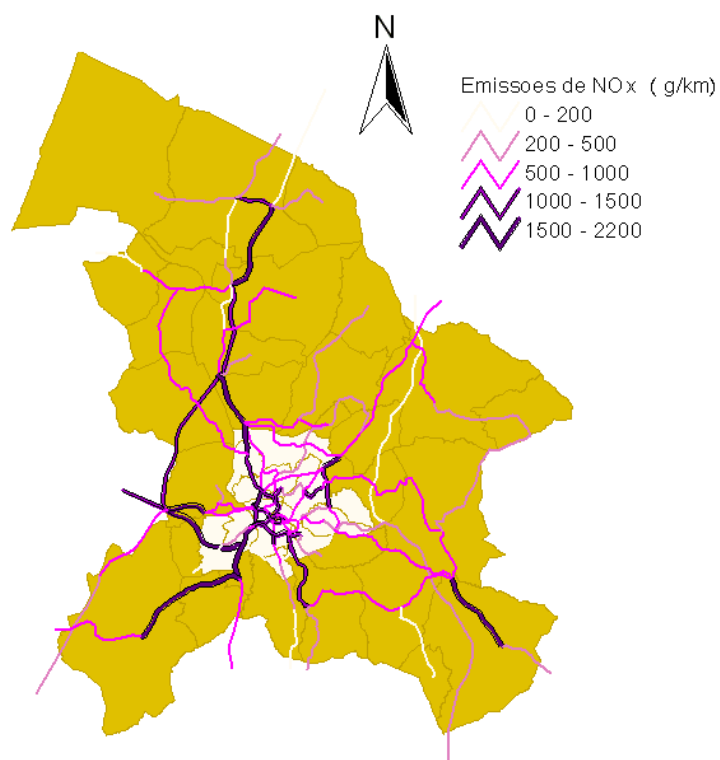
Categorias	%
Veículos Ligeiros de Passageiros a Gasolina	54,25%
Veículos Ligeiros de Passageiros a Gasóleo	18,07%
Veículos Ligeiros de Passageiros a GPL	0,32%
Veículos Ligeiros de Mercadorias a Gasóleo	24,34%
Veículos Pesados de Passageiros a Gasóleo	0,19%
Motociclos	2,83%

D. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS EMITIDOS

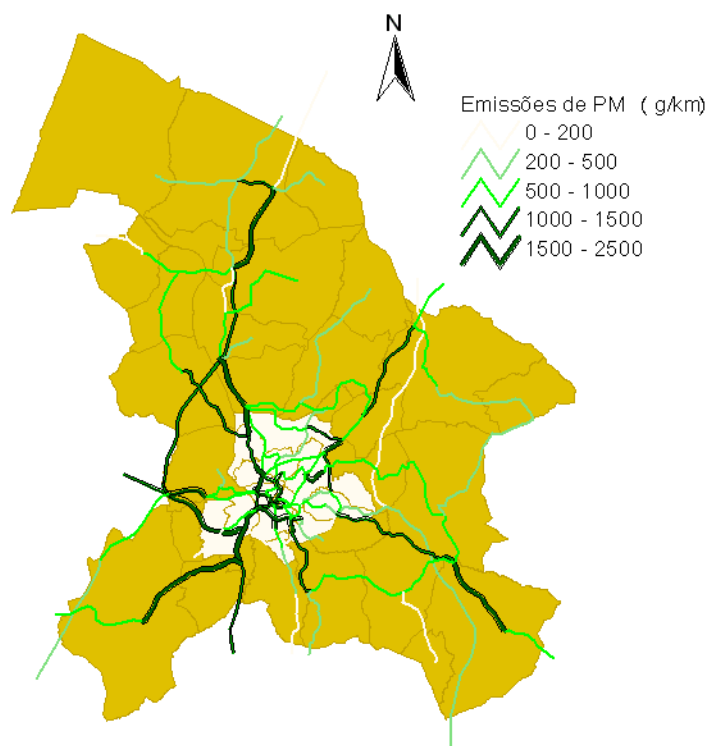
D.1 Distribuição espacial das emissões diárias de CO₂ (kg/km) no Município de Leiria.



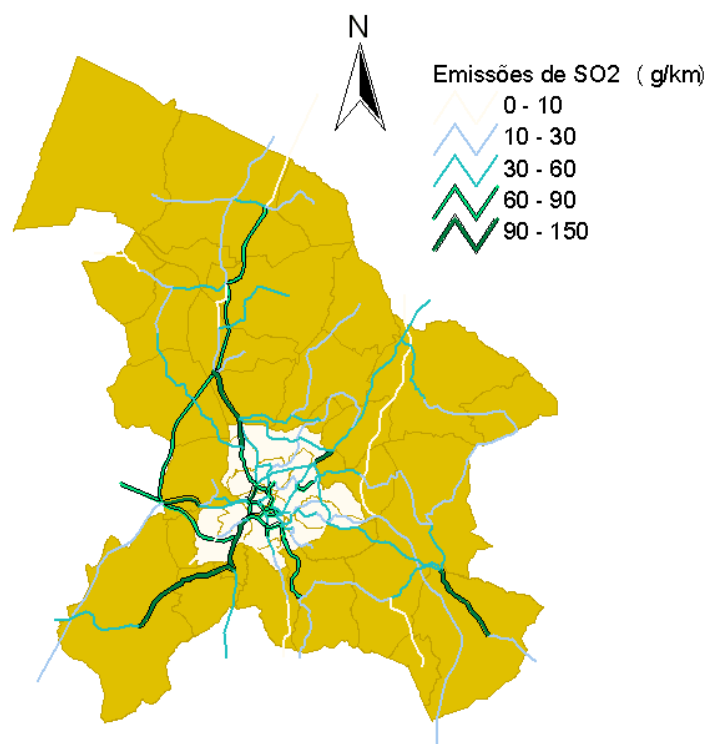
D.2 Distribuição espacial das emissões diárias de NO_x (g/km) no Município de Leiria.



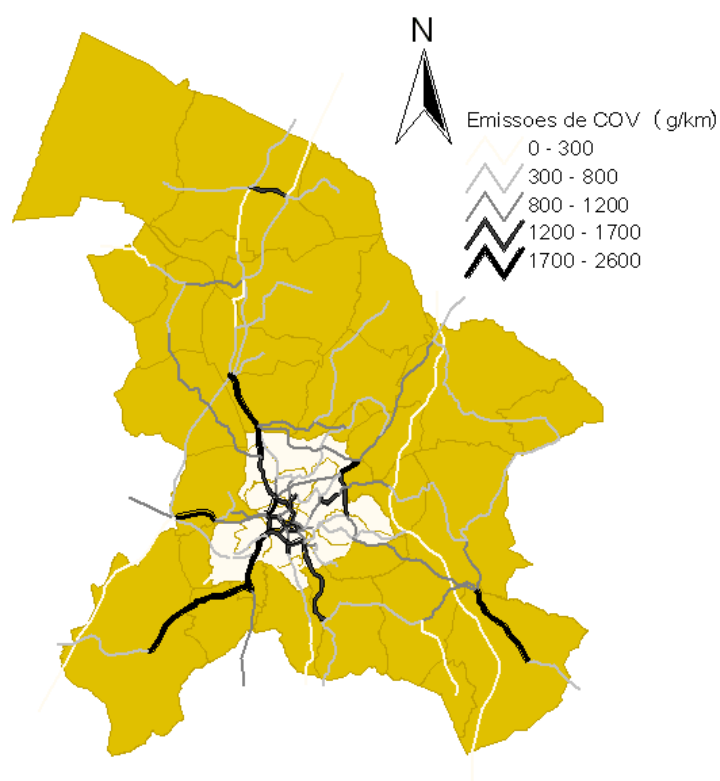
D.3 Distribuição espacial das emissões diárias de PM (g/km) no Município de Leiria.



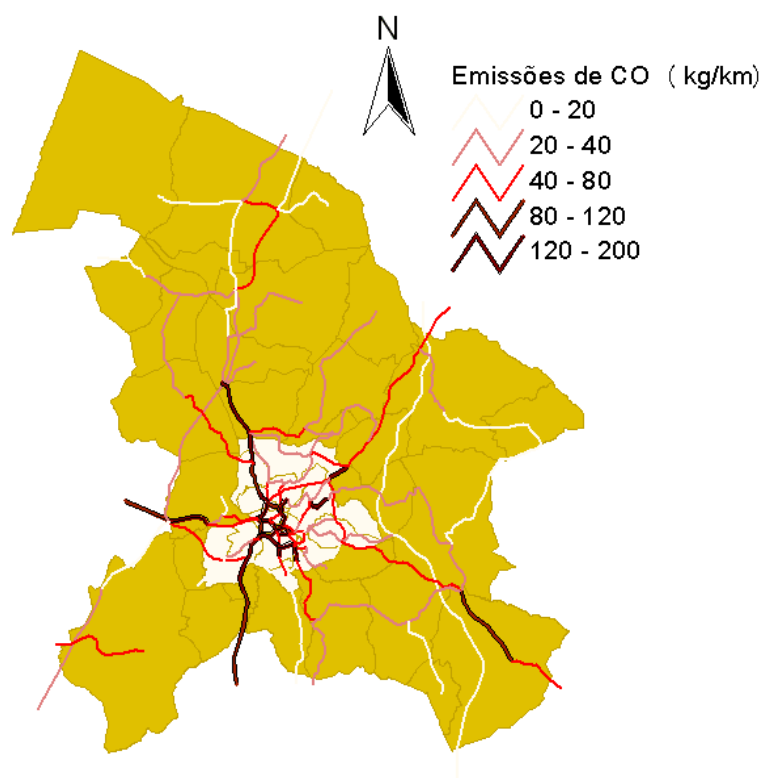
D.4 Distribuição espacial das emissões diárias de SO₂ (g/km) no Município de Leiria.



D.5 Distribuição espacial das emissões diárias de COV (g/km) no Município de Leiria.



D.6 Distribuição espacial das emissões diárias de CO (kg/km) no Município de Leiria.



E. DATAS DE IMPLEMENTAÇÃO DOS LIMITES DE EMISSÃO

	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	
Ligeiros de Passageiros a Gasolina	Pre ECE	ECE 15-00 & 01					ECE 15-02			ECE 15-03			ECE 15-04									
Ligeiros de Pass. a Gasóleo e GPL	Conventional																					
Ligeiros de Mercadorias	Conventional																					
Pesados de Merc. e de Pass.	Conventional																					
Motociclos	Conventional																					

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Ligeiros de Passageiros a Gasolina	ECE 15-04	EURO 1		EURO 1		EURO 2		EURO 2		EURO 3		EURO 3		EURO 4		EURO 4		EURO 4		EURO 5	
Ligeiros de Pass. a Gasóleo e GPL	Conv.	EURO 1		EURO 1		EURO 2		EURO 2		EURO 3		EURO 3		EURO 4		EURO 4		EURO 4		EURO 5	
Ligeiros de Mercadorias	Conventional	EURO 1		EURO 1		EURO 2		EURO 2		EURO 3		EURO 3		EURO 4		EURO 4		EURO 4		EURO 5	
Pesados de Merc. e de Pass.	Conv.	EURO 1		EURO 1		EURO 2		EURO 2		EURO 3		EURO 3		EURO 4		EURO 4		EURO 4		EURO 5	
Motociclos	Conventional										Stage 1					Stage 2					